HAL
archives-ouvertes.fr

L'interprétation causale de la mécanique quantique : biographie d'un programme de recherche minoritaire (1951–1964)

Virgile Besson

To cite this version:

Virgile Besson. L'interprétation causale de la mécanique quantique : biographie d'un programme de recherche minoritaire (1951–1964). Education. Université de Lyon; Universidade federal da Bahia, 2018. Français. NNT : 2018LYSE1014 . tel-01796940

HAL Id: tel-01796940

https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01796940

Submitted on 22 May 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre NNT : 2018LYSE1014

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON
opérée au sein de
L'Universidade Federal da Bahia
et
l'Université Claude Bernard Lyon 1

École Doctorale ED 485
Éducation, Psychologie, Information et Communication

Spécialité de doctorat : Épistémologie, histoire des sciences et des techniques

Soutenue publiquement le 15/02/2018, par :
Virgile Besson

L'interprétation causale de la mécanique quantique : biographie d'un programme de recherche minoritaire (1951–1964)

Devant le jury composé de :

Chaussard Lionel, Professeur, Université Claude Bernard Lyon 1	Président
Lacki Jan, Directeur de recherche, Université de Genève/CNRS	Rapporteur
Ruphy Stéphanie, Professeur, Université Jean Moulin Lyon 3	Rapporteure
Bustamante Martha Cecilia, Chercheuse, Université Paris Diderot	Examinatrice
Mattedi Dias André Luis, Professeur, Universidade Federal da Bahia	Examinateur
Vilain Christiane, Maitre de Conférences, Observatoire de Paris-Meudon	Invitée
Freire Jr. Olival, Professeur, Universidade Federal da Bahia	Directeur de thèse
Lautesse Philippe, Professeur, Université Claude Bernard Lyon 1	Co-directeur de thèse
Chabot Hugues, Maitre de Conférences, Université Claude Bernard Lyon 1	Co-directeur de thèse

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

Président de l'Université	**M. le Professeur Frédéric FLEURY**
Président du Conseil Académique	M. le Professeur Hamda BEN HADID
Vice-président du Conseil d'Administration	M. le Professeur Didier REVEL
Vice-président du Conseil Formation et Vie Universitaire	M. le Professeur Philippe CHEVALIER
Vice-président de la Commission Recherche	M. Fabrice VALLÉE
Directrice Générale des Services	Mme Dominique MARCHAND

COMPOSANTES SANTE

Faculté de Médecine Lyon Est – Claude Bernard	Directeur : M. le Professeur G.RODE
Faculté de Médecine et de Maïeutique Lyon Sud – Charles Mérieux	Directeur : Mme la Professeure C. BURILLON
Faculté d'Odontologie	Directeur : M. le Professeur D. BOURGEOIS
Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques	Directeur : Mme la Professeure C. VINCIGUERRA
Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation	Directeur : M. X. PERROT
Département de formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine	Directeur : Mme la Professeure A-M. SCHOTT

COMPOSANTES ET DEPARTEMENTS DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Faculté des Sciences et Technologies	Directeur : M. F. DE MARCHI
Département Biologie	Directeur : M. le Professeur F. THEVENARD
Département Chimie Biochimie	Directeur : Mme C. FELIX
Département GEP	Directeur : M. Hassan HAMMOURI
Département Informatique	Directeur : M. le Professeur S. AKKOUCHE
Département Mathématiques	Directeur : M. le Professeur G. TOMANOV
Département Mécanique	Directeur : M. le Professeur H. BEN HADID
Département Physique	Directeur : M. le Professeur J-C PLENET
UFR Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives	Directeur : M. Y.VANPOULLE
Observatoire des Sciences de l'Univers de Lyon	Directeur : M. B. GUIDERDONI
Polytech Lyon	Directeur : M. le Professeur E.PERRIN
Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique	Directeur : M. G. PIGNAULT
Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1	Directeur : M. le Professeur C. VITON
Ecole Supérieure du Professorat et de l'Education	Directeur : M. le Professeur A. MOUGNIOTTE
Institut de Science Financière et d'Assurances	Directeur : M. N. LEBOISNE

Les universités connaissent bien ces jeunes étudiants qualifiés et brillants qui, arrivant du secondaire, sont choqués de découvrir que la biologie ou la physique ne fonctionnent pas précisément comme on leur a appris. « Oui, mais il fallait d'abord que vous compreniez cela, leur répond-on, afin que, maintenant, nous puissions vous expliquer pourquoi ce n'est pas tout à fait vrai.» Les professeurs du Disque-monde le savent bien et s'en servent pour démontrer pourquoi les universités sont des mines de savoir au sens propre : les étudiants y entrent persuadés de connaître presque tout et ils en ressortent des années plus tard persuadés de ne connaitre presque rien. Où est parti le savoir entre-temps ? Dans l'université, bien sûr, où on le sèche et l'entrepose avec soin.

Terry Pratchett
La Science du Disque-monde

Sommaire

Résumé vii

Remerciements ix

Introduction 1

1 Aux origines de l'interprétation causale de la mécanique quantique 13

2 La réception inattendue de la théorie de Bohm en France 59

3 Les premiers travaux de Jean-Pierre Vigier sur l'interprétation causale 87

4 La représentation hydrodynamique de la mécanique quantique 129

5 Le modèle Bohm-Vigier et la théorie des niveaux d'organisation de la nature 151

6 Les particules à spin dans l'interprétation causale 177

7 Le programme oublié : le modèle unifié des particules 195

8 Une controverse dans la controverse : le débat quantique au sein du PCF 237

Conclusion 299

Annexes 305

A Archives 307

B Conventions d'écriture 377

C Démonstrations 381

Bibliographie **389**

Sigles et abréviations **427**

Index **439**

Résumé

L'interprétation causale de la mécanique quantique a été décrite en premier lieu par les historiens comme une conséquence de l'influence croissante du marxisme chez les physiciens des pays occidentaux. En effet, au cours des années 1950, le noyau du groupe de physiciens impliqués dans le programme causal autour de Jean-Pierre Vigier et Louis de Broglie à l'Institut Henri Poincaré est majoritairement constitué soit de membres, soit de sympathisants du PCF. Leurs travaux sont fortement influencés par les critiques soviétiques contre l'interprétation dominante de la mécanique quantique, l'interprétation dite de « Copenhague». Entre autres, Vigier critique le pragmatisme qui règne dans la physique de l'après-guerre et pense que le manque de réflexion philosophique est en grande partie responsable de la crise que traverse la physique fondamentale, telle que le problème de la renormalisation. Le groupe a également porté la question de l'interprétation de la théorie au sein du PCF d'où est née une controverse au sein du parti qui a soulevé la problématique de la relation entre le marxisme et la science.

La théorie fait également partie d'un programme de recherche plus global lié aux questions contemporaines en physique. Ce point est souvent oublié, ce qui mène à la conclusion erronée que la motivation du groupe IHP est seulement de nature idéologique et, par conséquent, que leur activité est hors de la science. Dès 1957, en collaboration avec des physiciens japonais, le groupe a proposé une théorie des particules élémentaires et un système de classification, à une époque où une théorie consensuelle manque encore.

Mots clés : mécanique quantique, interprétation causale, variables cachées, marxisme, Jean-Pierre Vigier, Louis de Broglie, David Bohm, Takehiko Takabayasi

Resumo

A interpretação causal da mecânica quântica foi, em primeiro lugar, descrita pelos historiadores como uma conseqüência da crescente influência do marxismo entre os físicos nos países ocidentais. Na verdade, durante a década de 1950, o núcleo do grupo de físicos envolvidos no programa causal em torno de Jean-Pierre Vigier e Louis de Broglie no Institut Henri Poincaré foi constituído principalmente por membros ou simpatizantes do PCF. Os trabalhos deles foram fortemente influenciados por críticos da União Soviética contra a interpretação padrão da mecânica quântica, chamada a interpretação de « Copenhague». Vigier criticou o pragmatismo que prevaleceu na física do período pós-guerra e pensou que a falta de considerações filosóficas era, em grande parte, responsável pela crise da física fundamental, como o problema da renormalização. Eles também colocaram a questão da interpretação da teoria dentro do PCF e criaram uma controvérsia dentro do partido que levantou a relação entre marxismo e ciência.

A teoria também fazia parte de um programa de pesquisa mais global ligado as questões contemporâneas em física. Este ponto é muitas frequentemente, o que leva à conclusão errada de que a motivação do grupo IHP era apenas ideológica e, portanto, com uma atividade fora da ciência. Já em 1957, em colaboração com físicos japoneses, o grupo propôs uma teoria das partículas elementares e um método de classificação, num período em que ainda faltava uma teoria padrão para estes fenômenos.

Palavras-chave : mecânica quântica, interpretação causal, variáveis escondidas, marxismo, Jean-Pierre Vigier, Louis de Broglie, David Bohm, Takehiko Takabayasi palavras-chave

Abstract

The Causal Interpretation of Quantum Mechanics was in the first place described by historians as a consequence of the growing influence of Marxism among physicists in Western countries. Indeed, during the 1950s, the core of the group of physicists involved in the Causal program around Jean-Pierre Vigier and Louis de Broglie at the Institut Henri Poincaré was mainly constituted either of members or sympathizers of the PCF. Their works were strongly influenced by critics from Soviet Union against the mainstream interpretation of Quantum Mechanics, the so called « Copenhagen » interpretation. Vigier criticized the pragmatism which prevailed in the Postwar physics and thought that the lack of philosophical considerations was in great part responsible for the crisis in fundamental physics, such as the problem of renormalization. They also put the issue of the interpretation of the theory inside the PCF and created a controversy inside the party which raised the relationship between Marxism and science.

The theory was also part of a more global research program linked with contemporary questions in physics. This point is often forgotten which leads to the erroneous conclusion that the motivation of the IHP group was only ideological and, therefore, their activity was out of science. As early as 1957, in collaboration with Japanese physicists, the group proposed a theory for elementary particles and a method of their classification, in a period in where a standard theory was still missing.

Keywords : Quantum Mechanics, Causal interpretation, Hidden variables, Marxism, Jean-Pierre Vigier, Louis de Broglie, David Bohm, Takehiko Takabayasi

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier mes codirecteurs, Hugues Chabot, Olival Freire Jr. et Philippe Lautesse qui m'ont accompagné pendant toute la durée de la thèse. Vous avez, chacun à votre manière, contribué à la bonne réalisation de ce travail. Merci pour votre patience et votre soutien.

Lorsque j'ai commencé cette thèse au mois d'avril 2012, dans un pays et une culture qui m'étaient complètement inconnus, j'ai su trouver au PPEFHC et au sein du LACIC de l'UFBa des gens d'une valeur inestimable (la culture du sigle est manifestement commune aux deux pays). Je tiens en particulier à remercier Thiago Hartz qui a été la première personne à m'accueillir chez elle ; Climério Silva Neto pour ces longues discussions sur la plage du Porto da Barra à propos de la vie, l'amour et la nature de classe de l'URSS et enfin Victoria Flório, même si je continue de penser que Slavoj Žižek est un charlatan. Grâce à ces personnes formidables et tant d'autres, j'ai trouvé au Brésil ma deuxième maison. Malgré des temps difficiles pour le pays, je suis certain que l'intelligence collective de sa population travailleuse saura relever les défis futurs qui l'attendent.

De retour en France, le laboratoire S2HEP a été mon deuxième terrain d'accueil. Je remercie chaleureusement toute son équipe, ses enseignant·e·s et ses (ex-)doctorant·e·s. En particulier, je ne peux que saluer Isabelle Dubois-Souchon pour sa grande tolérance aux ordres de mission qui arrivent en retard ; Baptiste Baylac-Paouly, le nouveau gardien de la Pagode ; Jennifer Bernard qui a repris la mission d'évangélisation et de diffusion de la bonne parole de Saint IGNUcius ; Adrien Vila Valls pour nos échanges passionnants autour de la mécanique quantique et ses conseils avisés ; Marion Cousin, pour sa bonne humeur et son énergie disponible en toute circonstance et Thibaut Serviant-Fine, pour les nombreuses discussions tardives sur fond de musique avant-gardiste des années 1980 (et la relecture du manuscrit). Et puis, Simon Gouz, en qui j'avais trouvé un exemple à suivre et dont il ne fait aucun doute que les travaux trouveront une postérité.

Je remercie le Service commun de sciences humaines et sociales de l'UCBL et son directeur, Jérôme Goffette, de m'avoir accueilli au sein de son équipe pour mes deux années d'ATER. Le SCSHS illustre le dévouement, l'abnégation et la capacité d'adaptation dont peuvent être capables les universitaires pour leurs étudiants, malgré un

contexte qui, tant s'en faut, n'est pas toujours favorable.

Le centre d'histoire de l'American Institute of Physics, dirigé par Greg Good, m'a permis de participer à ma première conférence internationale au mois d'avril 2014. Cette expérience a été d'une importance primordiale, tant sur le plan académique qu'humain. Je remercie également l'AIP d'avoir participé au financement de ce voyage. En favorisant les rencontres internationales et en permettant à de jeunes chercheurs d'échanger avec les seniors, l'AIP joue un rôle de première importance pour notre discipline en assurant son renouvellement. Si un jeune étudiant lit ces lignes, je voudrais l'interpeler sur l'importance d'être partie prenante d'une communauté puisque la recherche, y compris en sciences humaines et sociales, est un processus collectif.

Après avoir rappelé l'importance de la communauté, je me dois de saluer Jean-Philippe Martinez, mon compagnon de tous les congrès et désormais ami. On avait lancé les paris pour savoir qui de nous deux terminerait en premier, tu me devances de quelques mois. Bon voyage au Brésil.

Sans trop d'originalité pour l'histoire des sciences à Lyon, je remercie Pierre Crépel, la personne par qui tout ceci a commencé, au détour d'un printemps 2005 socialement mouvementé.

Enfin, je dédie ce travail à mes parents, Agnès et René, ainsi qu'à ma sœur, Maud, qui ont été des soutiens indéfectibles depuis toutes ces années.

Introduction

L'histoire de la mécanique quantique est intimement liée à l'histoire de la controverse autour de son interprétation. Avec la relativité, elle est la seconde « révolution » scientifique du XXe siècle, mais celle qui indéniablement bouleverse le plus profondément nos représentations de la réalité et heurte le sens commun. Avec l'introduction de la discontinuité, la découverte de la dualité onde-corpuscule pour la lumière et la matière, ainsi que l'impossibilité de décrire les phénomènes dans un espace tridimensionnel classique, la théorie semble indiquer qu'il faille renoncer à la causalité et au déterminisme, à la localité, voire même à la description objective des phénomènes. Des concepts qui semblaient pourtant être des acquis définitifs hérités de la physique classique. La mécanique quantique soulève ainsi de sérieuses questions philosophiques et épistémologiques sur les connaissances qui nous sont accessibles et nos représentations du monde. C'est ainsi que les physiciens et philosophes des sciences se sont penchés dès les années 1920, lorsque la théorie atteint sa forme « définitive », sur l'interprétation de son formalisme.

Tant s'en faut, les physiciens ne sont pas parvenus à se mettre d'accord autour d'une interprétation consensuelle. Deux grandes tendances se sont rapidement cristallisées autour de points de vue irréconciliables. Les premiers, suivant Niels Bohr, Werner Heisenberg, Pascual Jordan ou Wolfgang Pauli acceptent de renoncer à la description classique des connaissances et considèrent la mécanique quantique comme une théorie complète. Ils donnent naissance à l'interprétation souvent appelée de « Copenhague », pour une raison géographique, que nous dénommons pour notre part interprétation standard de la mécanique quantique (ISMQ). Les seconds, représentés entre autres par Albert Einstein, Erwin Schrödinger et Louis de Broglie (selon les périodes), pensent, au contraire, que l'indéterminisme quantique n'est pas un horizon indépassable et qu'il doit être possible, et même nécessaire, de compléter ou modifier la théorie, sans pour autant concorder entre eux sur le chemin théorique à suivre. La controverse est ainsi née, a su évoluer pour prendre différentes formes au cours du temps, mais elle n'a jamais été close, dans le sens où aucune des réponses aux différentes critiques soulevées n'a permis d'atteindre un consensus chez les physiciens. Quelle que soit la réponse apportée, il y a toujours un prix à payer qui ne peut satisfaire l'ensemble de la communauté en raison des sensibilités épistémologiques, philo-

sophiques et culturelles des différents acteurs. Pour reprendre la célèbre formule de l'historien Max Jammer, la controverse est « une histoire sans fin».[1] Selon la périodisation proposée par Olival Freire Jr., il est possible de distinguer trois principaux âges :[2]

- L'âge métaphysique, qui commence dans les années 1920 conjointement avec la naissance de la mécanique quantique perdure jusqu'au début des années 1950. Il correspond à la naissance de la controverse par les grands débats structurants évoqués à l'instant. Afin de mettre leurs critiques contre ce qu'ils considèrent être des paradoxes de l'ISMQ en relief, ces physiciens vont imaginer une série d'expériences de pensée, dont les plus célèbres sont celles du paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen (EPR), pour pointer l'« action effrayante à distance» (*spooky action at a distance*), et celle du chat de Schrödinger, à propos du problème de la mesure et de la superposition des états. Le terme métaphysique renvoie à la nature de ces débats qui sont perçus comme tels par la communauté des physiciens. En raison de leur absence de conséquence expérimentale, ils ne franchissent pas le seuil d'entrée des laboratoires. Les physiciens considèrent le débat quantique comme étant essentiellement une affaire de philosophes des sciences. Cette période est l'âge d'or de l'ISMQ qui gagne l'adhésion de la vaste majorité des physiciens et règle seule.

- Le troisième âge est celui de la légitimation de la controverse et son appropriation par la communauté des physiciens. Elle prend pour point de départ les années 1970 et se poursuit encore aujourd'hui. La principale caractéristique de cette période est, qu'à partir du début du milieu des années 1970, les physiciens entrevoient la possibilité de tester expérimentalement certaines propositions, comme la localité suite à la publication par John Bell de ses inégalités qui fixent des conditions que doit respecter toute théorie quantique locale. Le temps fort de cette période demeure les expériences d'Alain Aspect et de son équipe dans les années 1980 qui ont montré que les inégalités de Bell sont systématiquement violées, et qu'en conséquence il faut renoncer à la localité dans le domaine quantique. Cette légitimation possède un pendant institutionnel par la création de revues spécialisées, telle *Foundations of Physics*, et la tenue de congrès, telle la 29e école d'été de Varenna en juin 1970. Cette période est ainsi marquée par un regain d'intérêt pour les anciennes questions qualifiées de métaphysiques et, pour reprendre

1. Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics* (New York City, NY : John Wiley & Sons, 1974), 521.
2. Olival Freire Jr., «A Story Without an Ending : The Quantum Physics Controversy 1950–1970», *Science & Education* 12 (2003) : 573-586.

l'expression de Freire, la philosophie entre alors dans les laboratoires.[3]

- Entre ces deux âges, une période de transition prend place. Elle se caractérise par un regain d'intérêt pour les fondements de la mécanique quantique par un nombre croissant de physiciens et voit fleurir diverses interprétations alternatives à l'ISMQ. Pour autant, ces physiciens ne sont pas en réelle capacité de contester son hégémonie. La plus célèbre d'entre elles est indéniablement l'interprétation à l'aide de variables cachées de David Bohm publiée en 1952. L'interprétation de Bohm a entre autres motivé Bell dans sa réflexion sur la localité au début des années 1960. Il s'agit également en 1957 de la théorie des états relatifs, ou des multivers, de Hugh Everett qui propose une solution originale au problème de la réduction du paquet d'ondes lors de la mesure.

À travers ce résumé succinct, il apparait que la mécanique quantique et sa controverse constituent un matériau d'une très grande richesse pour l'historien des sciences. Cette histoire soulève en effet des problématiques de diverses natures : scientifique, épistémologique, culturelle et institutionnelles. De plus, la mécanique quantique n'évolue pas en dehors du mouvement général des sciences au XXe siècle qui suit le processus général de mondialisation et d'intensification de la production et des échanges. Au contraire, la physique théorique est la première discipline à bénéficier des bouleversements dans l'organisation scientifique engendrés par le phénomène de la « Big science ». En effet, la physique devient au cours du siècle une ressource dont la maitrise est un enjeu stratégique de première importance pour les états, en particulier dans le contexte de la Guerre froide et la question de la bombe.[4] Ainsi, la controverse mérite d'être étudiée dans la perspective de ce contexte global, pour qui conçoit que ces structures de plus large échelle sont elles aussi productrices de normes sociales, idéologiques et épistémiques.

En ce qui concerne notre thèse de doctorat, nous proposons d'étudier un épisode particulier de cette controverse, celui de l'interprétation causale de la mécanique quantique (ICMQ), qui commence en 1951 dans le sillon de la théorie des variables cachées de Bohm. Selon la catégorisation de Freire, il se situe tout au début de la période de transition. L'ICMQ se propose de décrire les phénomènes quantiques en maintenant les concepts et les images classiques afin de remédier aux difficultés conceptuelles de la théorie. Elle mobilise jusqu'à une dizaine de physiciens autour de Louis de Broglie et de Jean-Pierre Vigier au sein de l'Institut Henri Poincaré (IHP) à Paris, en colla-

3. Olival Freire Jr., « Philosophy enters the optics laboratory : Bell's theorem and its first experimental tests (1965–1982) », *Stud. Hist. Philos. Sci. B* 37, n° 4 (2006) : 577-616.

4. Sur ce sujet, voir entre autres : John Krige, « Atoms for peace, scientific internationalism, and scientific intelligence », *Osiris* 21, n° 1 (2006) : 161-181 ; John Krige, « The Peaceful Atom as Political Weapon : Euratom and American Foreign Policy in the Late 1950s », *Hist. Stud. Nat. Sci.* 38, n° 1 (2008) : 5-44.

boration avec Bohm et le physicien japonais Takehiko Takabayasi. Cette recherche d'une interprétation alternative est motivée par des considérations philosophiques et idéologiques. La plupart des physiciens impliqués dans le programme de l'ICMQ sont d'obédience marxiste, dont Vigier et Bohm. Ils ont en ligne de mire la préservation dans le domaine des quanta d'une forme classique de réalisme scientifique, qu'ils opposent au positivisme et à l'idéalisme de l'ISMQ. De plus, en tant que membres du Parti Communiste Français (PCF), ces physiciens vont porter le débat au sein de leur parti ce qui va donner naissance à une controverse interne au milieu communiste français.

L'ICMQ a déjà été étudiée par les historiens et les philosophes des sciences et nous aurons l'occasion de revenir sur la littérature à son sujet au cours de notre travail. Cependant, la plupart de ces travaux se concentrent essentiellement sur les tout premiers travaux qui suivent immédiatement la théorie des variables cachées de Bohm, dans la mesure où ils sont les seuls à avoir connu une postérité, en omettant ainsi la vaste étendue des recherches qui sont le fruit de la collaboration du physicien américain avec l'équipe de l'IHP pendant plus d'une décennie. Ainsi, les noms des physiciens français apparaissent dans la littérature, principalement ceux de Vigier et de Broglie, mais leurs contributions n'ont jamais fait l'objet d'une étude approfondie. Cette thèse de doctorat propose de combler cette lacune.

Une histoire centrée sur les contenus

Au carrefour de la science, de l'idéologie et de la politique, l'activité de ce groupe de physiciens de l'IHP peut s'envisager sous divers angles. Nous pouvons remarquer avec Claude Lévi-Strauss qu'il serait chimérique de prétendre traiter cette histoire dans sa totalité et une sélection doit nécessairement s'opérer, car « pour autant que l'histoire aspire à la signification, elle se condamne à choisir des régions, des époques, des groupes d'hommes et des individus dans ces groupes, et à les faire ressortir, comme des figures discontinues sur un continu tout juste bon à servir de toile de fond. Une histoire totale se neutraliserait elle-même, elle serait égale à zéro.»[5] Notre choix se porte sur une étude attentive du contenu scientifique de l'ICMQ mis en perspective avec le réalisme scientifique de ses auteurs qui s'incarne dans le matérialisme philosophique des communistes et dans une pensée proche du rationalisme cartésien en ce qui concerne de Broglie. Notre problématique pourrait se résumer à comprendre comment, à travers cette étude de cas, s'effectue la mise en équation du réalisme scientifique. Le choix d'intituler ce travail de biographie souligne que notre objet historique est la genèse et le développement d'un programme de recherche que nous ne coupons pas de tout contexte. Le récit prend place sur une période qui s'étend de 1951, date

5. Claude Lévi-Strauss, *La Pensée Sauvage* (Paris : Plon, 1962), 341.

de la réception de la théorie de Bohm en France, jusqu'à 1964–1965, qui correspond à un moment charnière pour l'ICMQ pour des motifs scientifiques et politiques, dont l'un des objectifs fixés par cette thèse sera d'expliciter. L'étendue de cette période, couplée au nombre de physiciens impliqués, interdit une étude exhaustive de l'ensemble des travaux qui représente plus de deux cents articles, sans omettre les ouvrages et les comptes rendus de séminaires. Ainsi une sélection sur les sources doit s'opérer. Pour ce faire, plusieurs critères peuvent être retenus.

Le premier est celui de la postérité, c'est-à-dire de se concentrer essentiellement sur les travaux qui encore aujourd'hui sont reconnus par la communauté des physiciens comme pertinents et dignes d'intérêt. Une manière d'évaluer cette postérité est de s'appuyer sur la scientométrie afin de recueillir des données quantitatives sur la diffusion et la réception de l'ICMQ. Le choix de la postérité peut être légitime et guide d'ailleurs une partie significative des travaux en histoire des sciences. Cependant, il faut veiller à éviter deux principaux écueils. Le premier, téléologique, consisterait à construire l'histoire des théories passées en fonction de la science contemporaine qui en serait la finalité. Le deuxième est d'écrire la science des « vainqueurs» et de quelques grandes figures, qui est le pendant en histoire des sciences de l'histoire des grands hommes qui abreuve le roman national.[6] Comme le remarque David Bloor, le sociologue ou l'historien des sciences doit, à la manière du mécanicien, autant comprendre les machines qui fonctionnent que celles qui ne fonctionnent pas.[7] Or, un constat s'impose rapidement, l'ICMQ est demeurée très confidentielle. Avec les données du Web of Science, on s'aperçoit que très peu d'articles dépassent la dizaine de citations, et qu'une majorité d'entre elles correspondent en réalité à des autocitations, ou alors des citations des différents collaborateurs travaillant sur l'ICMQ.

Les contraintes sur notre sujet nous ont amenés à adopter la perspective exactement inverse. Par neutralité axiologique, nous avons porté notre regard en premier lieu sur les travaux qui font sens du point de vue des partisans de l'ICMQ au moment de leur réalisation. En suspendant notre jugement, nous nous sommes demandé dans quelle mesure il serait possible d'écrire une histoire de l'ICMQ « à la Schweber», à la manière de son magistral *Q.E.D and the men who made it*.[8] Autrement dit, consi-

6. À ce propos, voir l'ouvrage de Clifford D. Conner qui, bien qu'il soit critiquable d'un point de vue épistémologique en assimilant la technique à la science, propose un point de vue intéressant sur la production des sciences par les gens « ordinaires», en reprenant l'esprit d'Howard Zinn pour son histoire des États-Unis. Clifford D. Conner, *Histoire populaire des sciences*, trad. Alexandre Freiszmuth (Paris : L'échapée, 2011) ; Howard Zinn, *Une histoire populaire des États-Unis : De 1492 à nos jours*, trad. Frédéric Cotton (Paris : Agone, 2002).

7. David Bloor, *Knowledge and social imagery* (Londres : Routledge Kegan & Paul, 1976) ; Cité dans : Therry Shinn et Pascal Ragouet, *Controverses sur la science : Pour une sociologie transversaliste de l'activité scientifique* (Paris : Raisons d'agir, 2005).

8. Silvan S. Schweber, *QED and the men who made it : Dyson, Feynman, Schwinger and Tomonaga* (Princeton, NJ : Princeton University Press, 1994).

dérer l'ICMQ comme un programme de recherche en tant que tel, à l'image de l'élaboration de la Théorie Quantique des Champs (TQC). Bien entendu, il s'agit d'une posture méthodologique qui ne souhaite pas verser dans le relativisme et qu'il n'est pas possible de respecter systématiquement. Si l'ICMQ n'a pas réussi à se constituer en véritable alternative à l'ISMQ, c'est en partie pour des difficultés internes à la théorie que nous aurons l'occasion d'évoquer. Cependant, nous voulions éviter d'aborder l'ICMQ en premier lieu comme une interprétation marginale en nous focaliser sur son échec, mais, au contraire, étudier sérieusement la production théorique de ces physiciens afin de comprendre leur discours sur la problématique du réalisme en physique quantique, et ainsi alimenter la réflexion sur ce sujet.

Notre travail fait la part belle aux contenus proprement mathématiques de l'ICMQ. En effet, les mathématiques sont historiquement le langage choisi par les scientifiques pour exprimer les concepts physiques et nous avons considéré en conséquence qu'il n'était pas possible de passer outre la retranscription de certains résultats et démonstrations que nous avons intégrés dans le corps du texte. De plus, le fait de travailler sur une théorie minoritaire impose une contrainte supplémentaire d'explicitation de son formalisme avant de pouvoir en présenter une analyse. Il est en effet impossible de renvoyer le lecteur vers d'autres textes qui auraient déjà réalisé ce travail d'exposition préalable. Ainsi, notre travail comporte une dimension d'exégèse des travaux théoriques. En conséquence, quelques passages pourront paraitre obscurs pour le lecteur qui ne possède pas un certain bagage en mathématiques. Nous pensons en particulier à certains développements des chapitres 3 et 6. Ces passages ne sont toutefois pas indispensables à la compréhension générale de notre propos et ils sont d'ailleurs repris et synthétisés dans d'autres parties. Dans l'annexe B.1 page 377, nous précisons les principales notations et conventions mathématiques que nous avons employées.

D'aucuns qualifieraient notre perspective d'internaliste, mais nous récusons cette appellation pour plusieurs raisons. D'une part, elle renvoie à une querelle historiographique datée entre internalisme et externalisme qui, à notre avis, ne correspond plus à la réalité de la discipline de l'histoire des sciences d'aujourd'hui qui a su dépasser ce clivage. Des catégorisations alternatives nous semblent d'ailleurs plus pertinentes afin de différencier les approches en histoire et sociologie des sciences, entre autres celle de Terry Schinn et Pascal Ragouet entre différenciationnisme et antidifférenciationnisme.[9] D'autre part, la signification de la dichotomie entre internalisme et externalisme est ambigüe si l'on s'en tient à la définition que donne en 1961 Georges Canguilhem de ces eux termes :

> L'externalisme c'est une façon de décrire l'histoire des sciences en conditionnant un certain nombre d'événements – qu'on continue à appeler

9. Shinn et Ragouet, *Controverses sur la science*.

> scientifiques plutôt par tradition que par analyse critique – par leurs rapports avec des intérêts économiques et sociaux, avec des exigences et des pratiques techniques, avec des idéologies religieuses ou politiques. C'est en somme, un marxisme affaibli ou plutôt appauvri, ayant cours dans les sociétés riches. L'internalisme – tenu par les premiers pour idéalisme – consiste à penser qu'il n'y a pas d'histoire des sciences, si l'on ne se place pas à l'intérieur même de l'œuvre scientifique pour en analyser les démarches par lesquelles elle cherche à satisfaire aux normes spécifiques qui permettent de la définir comme science et non comme technique ou idéologie. Dans cette perspective, l'historien des sciences doit adopter une attitude théorique à l'égard de ce qui est retenu comme fait de théorie, par conséquent utiliser des hypothèses, des paradigmes, au même titre que les savants eux-mêmes.[10]

En effet, il y a deux manières de comprendre cette distinction. Dans un premier sens, assez restreint, il s'agit uniquement d'une « manière de décrire l'histoire». Dans cette perspective, internalisme et externalisme s'envisagent en tant que méthodologies. Pour un même sujet d'étude, il est en effet possible d'adopter plusieurs angles d'analyse différents, l'un se concentrant sur les contenus scientifiques et épistémologiques, tandis que l'autre sur les aspects institutionnels, culturels, politiques et sociaux. Cependant, dans une seconde lecture, cette distinction concerne l'origine même des connaissances scientifiques. Sont-elles, d'un point de vue internaliste, le produit de la raison humaine et de l'application d'une démarche particulière aux sciences qui permet d'atteindre la vérité ? Ou bien, est-ce que ladite méthode scientifique n'est elle pas produite par un contexte historique et social, et alors son universalité ne serait qu'une illusion, puisqu'historiquement située ?

La distinction entre internalisme et externalisme est habituellement comprise dans cette deuxième acceptation, ce qui est une raison supplémentaire pour nous de refuser de qualifier notre démarche d'internaliste ou d'externaliste. À ce propos, le commentaire de Canguilhem, qui caractérise l'externalisme en un « marxisme appauvri» mérite un commentaire par sa justesse. En effet, le marxisme est souvent désigné comme étant à l'origine de l'externalisme en histoire des sciences. En particulier, la communication de Boris Hessen sur les racines sociales et économiques des *Principia* de Newton lors du deuxième Congrès mondial d'histoire des sciences de Londres en 1931 est présentée comme le texte fondateur de l'externalisme. Cependant, dans sa postface à la traduction française de 2006 du texte de Hessen, Christopher Chilvers remarque qu'il s'agit d'un contresens sur la thèse de Hessen, principalement propagé par la lecture de

10. Georges Canguilhem, *Études d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie* (1994 ; Vrin, 2002), 15 ; Cité dans : Nicolas Grimoult, «Internalisme contre externalisme», chap. 7 in *Histoire de l'histoire des sciences* (Pars, Genève : Libraire Droz, 2003), 139-144.

Robert K. Merton qui en restreint considérablement la portée.[11] Chilvers note que cette division n'a pas de sens chez Hessen, et qu'il a en quelque sorte déjà dépassé ce clivage en 1931, puisqu'il n'oppose pas les facteurs internes et externes dans la pensée de Newton. Pour un marxiste, cette distinction ne peut d'ailleurs être que relative. Sinon, elle suppose un dualisme philosophique irréductible entre la pensée et le monde extérieur, entre l'individu et le social. En outre, l'« externalisme» de Hessen ne remet pas en cause le contenu de la science et sa prétention à accéder à la réalité objective. Il se distingue ainsi de l'externalisme des travaux associés au « Programme fort» en sociologie de la connaissance qui penche allègrement du côté du relativisme, à l'origine de l'épisode de la « Guerre des sciences» dans le milieu des années 1990.[12]

Notre étude se focalise principalement sur la production scientifique que nous analysons en rapport au réalisme scientifique, qui résulte chez Vigier et ses collaborateurs de leur adhésion au marxisme. Or, selon la définition de Canguilhem, le marxisme relève des facteurs idéologiques externes. La plupart de ces physiciens ont effectivement adhéré au PCF avant ou pendant la Seconde Guerre mondiale, pour des motifs avant tout liés à la situation politique et sociale de leur pays. Leur engagement communiste précède temporellement et causalement leur réflexion sur l'interprétation de la mécanique quantique et va fortement l'orienter. *A contrario*, leur travail de physicien théoricien, guidé par la résolution de problèmes concrets, va également alimenter leur compréhension du marxisme. L'exemple le plus évident est l'évolution de leur rapport au déterminisme. Or, sur le terrain de la politique, la question du déterminisme est cruciale pour le marxisme puisqu'elle touche à la fois la question de la nécessité de la révolution, mais également de la possibilité de la planification dans le cadre d'une économie socialisée. Dès lors, ce qui relève de l'« interne» modifie le facteur « externe», et *vice versa*. Ces précisions effectuées, nous préférons qualifier notre démarche de centrée sur les contenus scientifiques, qui possède l'avantage d'échapper à la dichotomie externe/interne simpliste et ambigüe, tout en laissant ouverte à la discussion la question du statut de la vérité scientifique.

Plan de la thèse

La thèse se divise en huit chapitres qui suivent dans l'ensemble en ordre chronologique, mis à part le dernier chapitre. La présentation chronologique possède l'avan-

11. Christopher Chilvers, postface à *Les Racines sociales et économiques des Principia de Newton : Une rencontre entre Newton et Marx à Londres en 1931*, par Boris Hessen, trad. Serge Guérout (1931 ; Paris : Vuibert, 2006), 203–205.

12. Gideon Freudenthal et Peter McLaughlin, «Classical Marxist Historiography of Science : The Hessen-Grossmann-Thesis», in *The Social and Economic Roots of the Scientific Revolution : Texts by Boris Hessen and Henryk Grossmann*, sous la dir. de Gideon Freudenthal et Peter McLaughlin, t. 278, Boston studies in the philosophy of science (Heidelberg : Springer Netherlands, 2009), 41-102.

tage de suivre pas à pas les évolutions de l'ICMQ. Cependant, par rapport à un plan thématique, ce choix peut être propice à certaines répétitions et à la fragmentation de l'argumentation. Nous avons pallié ces difficultés de deux manières. D'une part, nous avons dégagé des thèmes principaux dans chaque chapitre. D'autre part, nous faisons des renvois réguliers vers différentes sections lorsqu'une thématique est reprise et développée ailleurs au cours de la thèse. Enfin, le lecteur trouvera en fin de thèse la table des matières détaillée.

Le premier chapitre revient sur les deux modèles théoriques qui ont donné naissance à l'ICMQ : les théories de l'onde pilote et de la double solution, élaborées par Louis de Broglie à la fin des années 1920 dans la poursuite de ses travaux de thèse, et la théorie des variables cachées de David Bohm de 1951-1952. Par une mise en contexte de leurs genèses et de leurs contenus, nous aurons l'occasion de constater que ces deux théories partagent de nombreux points communs, principalement dans leur représentation des phénomènes quantiques à l'aide d'équations du mouvement classiques, mais aussi des différences tant sur le plan formel que sur le plan conceptuel. Nous aborderons également la réception et la diffusion immédiate des travaux de de Broglie et de Bohm. Ce chapitre s'appuie pour une large part sur l'abondante littérature secondaire disponible sur ces deux théories. Toutefois, la restitution et l'analyse des contenus proprement scientifiques sont le fruit d'un travail personnel.

Le second chapitre se concentre sur le court épisode de la réception des variables cachées de Bohm en France entre l'été 1951 et l'automne 1952. Il sera l'occasion de préciser les raisons qui ont permis la collaboration entre Bohm, de Broglie et un groupe de jeunes physiciens communistes autour de Jean-Pierre Vigier. À partir de la correspondance entre David Bohm et Évry Schatzman, nous constaterons que le climat du début de cette collaboration est à la suspicion envers de Broglie, en raison d'un conflit latent de priorité entre Bohm et de Broglie.

Le troisième chapitre étudie spécifiquement les premiers travaux de Vigier sur l'ICMQ alors qu'il poursuit son doctorat sous la direction de de Broglie à l'IHP entre l'automne 1952 et l'hiver 1954. Plus précisément, nous avons sélectionné parmi ces travaux ceux qui précèdent sa collaboration effective avec Bohm en 1953. Ces travaux sont l'occasion pour Vigier de se pencher sur l'ancienne théorie de la double solution de de Broglie, abandonnée en 1927 et dont il pense pouvoir faire le lien avec la relativité générale.

Au cours du chapitre quatre, nous aborderons les travaux du physicien japonais Takehiko Takabayasi qui va devenir un des collaborateurs de Bohm et de Vigier. À partir de la théorie des variables cachées de Bohm, celui-ci étudie les différentes formulations à l'aide d'images classiques de la mécanique quantique. Il s'intéresse particulièrement à la représentation hydrodynamique, originellement formulée par Madelung en 1927. Il va proposer un certain nombre d'améliorations à cette représentation qui vont

convaincre Bohm et Vigier de la pertinence de ce modèle par rapport à une description newtonienne des trajectoires des particules.

Le chapitre cinq se consacre à la collaboration entre Vigier et Bohm en 1953 lors de la visite du premier au second à São Paulo pendant l'été 1953. Cette collaboration reprend la représentation hydrodynamique pour y ajouter un milieu subquantique à l'origine de fluctuations chaotiques du fluide quantique. Cette hypothèse physique sert en particulier à démontrer la règle de Born qui définit la répartition statistique des particules dans le système. En lien avec le milieu subquantique, Bohm et Vigier vont proposer un cadre conceptuel pour penser la dialectique entre déterminisme et hasard qui prend le nom de « théorie des niveaux d'organisation de la nature ».

L'objet du sixième chapitre est l'introduction du spin dans l'ICMQ à travers l'étude spécifique du modèle de Bohm, Schiller et Tiomno par la méthode des angles d'Euler. La description classique du spin en l'assimilant à un mouvement de rotation interne de la particule sur elle-même est intéressante dans la mesure où le spin est une propriété d'origine purement quantique sans aucun équivalent classique. Cet exemple est une bonne illustration du défi que représente le maintien des représentations classiques en mécanique quantique. Comme évoqué précédemment, il s'agit d'un chapitre assez technique sur le plan de la physique. Nous avons tout de même considéré qu'il a toute sa place dans ce travail, dans la mesure où ces travaux nous aident à comprendre cette mise en équation du réalisme. De plus, les principaux résultats de ce chapitre seront repris et synthétisés en conclusion du chapitre suivant.

Le septième chapitre est dédié au modèle des particules élaboré à l'IHP entre 1957 et 1964 en collaboration avec Bohm et Takabayasi et à l'occasion du voyage de recherche Vigier au Japon dans l'équipe de Yukawa à Kyoto en 1961–1962. Ce programme méconnu propose un modèle de classification des particules avant l'arrivée des quarks. Ces travaux se situent relativement à part dans la généalogie de l'ICMQ tant du point de vue de leur objet que de leur approche. Nous verrons qu'ils introduisent certaines ruptures épistémologiques, en particulier par l'emploi de la procédure de quantification identique à celle de l'ISMQ. La conclusion de ce chapitre sera l'occasion de préciser le rapport non trivial qu'entretient l'ICMQ avec la mécanique classique en nous appuyant sur les différentes contributions théoriques étudiées au cours de cette thèse.

Enfin, le huitième et dernier chapitre revient sur le débat spécifique entre les communistes français sur les fondements de la mécanique quantique. Vigier est un militant actif du PCF dans lequel il possède des responsabilités locales puis nationales. À l'IHP, il a également su s'entourer d'autres jeunes physiciens du Parti pour travailler avec lui sur l'ICMQ. Sa théorie va rapidement faire parler d'elle dans le milieu des intellectuels communistes, dans un contexte particulier alimenté par le soutien puis le rejet de la théorie stalinienne de l'existence de deux sciences, bourgeoise et prolétarienne. Pendant une décennie, une controverse propre au milieu communiste va voir s'affronter

les défenseurs et les adversaires de l'ICMQ. Ce débat quantique de l'après-guerre est mis en perspective avec l'interprétation de la mécanique quantique avant la guerre par les deux plus illustres physiciens marxistes français de cette période, Paul Langevin et Jacques Solomon.

Les sources

Ce travail a été réalisé par la mobilisation de trois grandes familles de sources primaires.

La première est un ensemble de publications scientifiques de différentes natures. Notre thèse étant méthodologiquement centrée sur les contenus, ce type d'archive occupe quantitativement une place prépondérante. Il s'agit pour une large part d'articles publiés dans diverses revues, principalement dans *Physical Review*, *Progress of Theoretical Physics* et des notes aux *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*. Ces articles sont complétés par des ouvrages, en particulier ceux de Broglie qui proposent régulièrement des synthèses de l'avancée des travaux. Le format livre permet à leurs auteurs de préciser les aspects conceptuels qui sont souvent absents ou réduits à leur portion congrue dans les articles. Quelques thèses de doctorat ont également été consultées, en particulier pour les premier et quatrième chapitres qui s'appuient sur celles de de Broglie et de Vigier. Toutes ces publications sont complétées par divers comptes rendus de séminaire et de colloques, dont ceux du séminaire de théorie physique de Louis de Broglie.

Un second groupe de sources se compose des documents d'archives provenant de divers fonds. Une majeure partie de ces archives est constituée de la correspondance privée entre les physiciens. En particulier, celle très riche entre Bohm et Schatzman nous a permis de mettre en contexte la réception des variables cachées en France abordée au second chapitre sous un nouvel angle. Grâce aux archives du PCF ainsi que celles du Ministère de l'Intérieur, nous avons pu comprendre certains aspects de l'engagement politique des physiciens communistes. À notre grand regret, les archives personnelles de Vigier sont quasiment inexistantes.[13] Un autre manque concerne les archives de l'IHP qui ne sont malheureusement pas encore indexées, et dont les conditions matérielles dans lesquelles cette thèse s'est réalisée ne nous ont pas permis de consulter.

Enfin, une dernière catégorie, spécifique au dernier chapitre à propos de la controverse entre les communistes français, rassemble les publications du PCF en rapport à la mécanique quantique. Ce sont majoritairement des articles publiés au sein des deux revues *la Pensée* et *la Nouvelle critique*. *La Pensée*, fondée par Paul Langevin en

13. Son ancien collègue Nicola Cufaro Petroni s'est occupé de mettre en cartons l'énorme quantité de documents entassés dans le bureau de Vigier à Jussieu en 2004 lorsqu'il était sur son lit de mort. Après le désamiantage du campus, les cartons n'ont pas été conservés. Nicola Cufaro Petroni, correpondance personnelle avec l'auteur, février 2014.

1939, n'est pas directement affiliée au PCF mais elle en est idéologiquement très proche (Georges Cogniot, son rédacteur en chef est membre du Comité central du PCF). *La Nouvelle Critique* est pour sa part organiquement liée au PCF. Nous avons relevé systématiquement les sommaires de ces deux revues sur des périodes qui s'étendent de 1939 à 1965 pour la première et de 1948 à 1965 pour la seconde. Ces articles sont complétés par divers écrits annexes publiés dans d'autres revues et journaux, tels l'*Union Rationaliste* ou le quotidien l'*Humanité*, ainsi que par divers ouvrages.

La bibliographie en fin de document ne suit pas cette division logique pour adopter une unique séparation entre sources primaires et secondaires selon les standards académiques en vigueur. Elle regroupe ainsi toutes les publications d'un même auteur en un même endroit. Nous avons toutefois créé une section à part pour la correspondance ainsi qu'une autre pour les documents d'archives à des fins de facilité de lecture. Enfin, la division entre sources primaires et secondaires étant relative, exceptionnellement certains auteurs, comme Takabayasi, peuvent, en fonction de leurs écrits, se retrouver dans l'une ou l'autre des catégories. De plus, certains écrits sont mobilisés à la fois en tant que source primaire et secondaire. Par exemple, Andrew Whitaker, cité dans le chapitre 8, apparait dans la littérature secondaire, car il nous a aidés à comprendre une démonstration de Jacques Solomon, mais, en tant que son article est aussi traité comme une source historique, il aurait légitimement pu figurer dans les sources primaires.

À noter que la correspondance non publiée ainsi que divers documents d'archives sont reproduits respectivement dans les annexes A.1 et A.2. Les documents sont classés par ordre chronologique plutôt que par auteur, car cet ordre nous a semblé plus naturel. Le lecteur peut consulter la table des matières située à la fin de la thèse pour connaitre la liste des documents retranscrits.

Note sur les traductions

Afin de rendre la lecture du texte plus fluide, nous avons traduit l'intégralité des citations dans le corps du texte. Lorsque plusieurs choix de traduction s'offraient à nous, nous avons systématiquement privilégié le respect du sens plutôt que la fidélité littéraire du texte original. Dans tous les cas, les citations extraites des documents publiés sont systématiquement présentes dans leur langue originale en note de bas de page. Concernant la correspondance non publiée, le lecteur est invité à se référer aux annexes.

Chapitre 1

Aux origines de l'interprétation causale de la mécanique quantique

Ce premier chapitre expose les contextes de découverte des deux principales théories à l'origine de l'ICMQ, soit, d'une part, celle de la double solution et de l'onde pilote formulées par Louis de Broglie en 1927, et, d'autre part, celle des variables cachées de David Bohm de 1951. Ces deux théories possèdent de nombreux points communs. Elles proposent toutes les deux une explication déterministe des phénomènes quantiques enveloppée dans un formalisme mathématique analogue, si bien qu'elles sont aujourd'hui souvent rassemblées, dans la littérature scientifique, sous l'appellation commune d'« interprétation de de Broglie-Bohm », la théorie de Bohm étant considérée comme une amélioration de la première. Cependant, cette dénomination est réductrice du point de vue historique, puisqu'elle tend à masquer un certain nombre de divergences entre de Broglie et Bohm dans leurs interprétations du formalisme mathématique et, plus fondamentalement, dans leurs représentations de la réalité quantique. Au chapitre 2, nous verrons que ces divergences vont jouer leur rôle dans l'accueil, initialement négatif, que va réserver de Broglie à la théorie de Bohm.

1.1 Les théories de l'onde pilote et de la double solution de Louis de Broglie

Les théories de la double solution et de l'onde pilote sont élaborées par Louis de Broglie dans le courant de l'année 1927. Cette partie présente brièvement le parcours de Louis de Broglie depuis son début de carrière de physicien quantique jusqu'à la fin des années 1920, lorsqu'il décide brusquement d'abandonner le programme de la

double solution et de rallier l'ISMQ. Il sera montré en particulier que les deux théories s'inscrivent dans la continuité directe de ses premiers travaux sur les quanta, dont la contribution la plus connue aujourd'hui demeure l'hypothèse des ondes de matière formulée en 1924 dans sa thèse de doctorat.

1.1.1 Louis de Broglie, un physicien au profil atypique

Né dans un milieu aristocratique d'origine piémontaise le 15 aout 1892, Louis de Broglie n'est pas prédestiné à embrasser une carrière scientifique. Il poursuit initialement un cursus littéraire, et obtient une licence ès lettres en 1910. Toutefois, il se ravise pour marcher dans les traces de son frère ainé, Maurice, en s'orientant vers les sciences physiques, discipline dans laquelle il obtient une seconde licence en 1913. Appelé la même année au service militaire pour six ans, ce n'est qu'après la guerre et sa démobilisation en 1919 que sa carrière de physicien commence réellement.

Il intègre le laboratoire privé de physique expérimentale de son frère, rue Lord-Byron à Paris, en pointe sur l'étude des spectres atomiques. Par l'intermédiaire de Maurice, Louis de Broglie côtoie le milieu des physiciens français, notamment Paul Langevin dont il suit les cours au Collège de France. La rencontre avec Langevin est des plus précieuse puisqu'elle lui ouvre une des rares portes sur la physique allemande des quanta et de la relativité, à l'avant-garde, mais peu enseignée en France. Bien qu'il travaille dans un laboratoire expérimental, le domaine de Louis de Broglie concerne la théorie.

Jusqu'en 1922, il étudie principalement les rayons x et la classification des raies spectrales. Il publie un certain nombre de notes sur le sujet avec Alexandre Dauvillier. Son statut de théoricien au milieu d'expérimentateurs l'isole professionnellement des autres membres du laboratoire. Les collaborations sont rares et répondent à des besoins d'éclaircissements théoriques ponctuels plutôt que de former de véritables coopérations. S'il travaille seul, souvent enfermé dans son bureau, sa pratique théorique est néanmoins façonnée par le contact direct avec les dernières avancées expérimentales.[1] Cette orientation théorique qui s'appuie sur une physique expérimentale de pointe est, dans les années 1920, encore singulière dans le paysage scientifique français. Louis de Broglie est, avec Léon Brillouin, le premier véritable physicien-théoricien non issu du milieu des mathématiciens. Par là, comprenons dont la préoccupation est le seul développement de la théorie physique.[2]

En effet, la physique française de la première moitié du XXe siècle hérite de son or-

1. Georges Lochak, *Louis de Broglie* (Paris : Flammarion, 1992), 65-80.
2. Dominique Pestre, *Physique et physiciens en France, 1918-1940* (Paris : Éditions des archives contemporaines, 1992), 119-134.

Fig. 1.1: Louis de Broglie, en haut à gauche, aux côtés d'Alexandre Dauvillier, au centre, de Jean Thibaud à droite et de son frère Maurice de Broglie, en bas, au sein du laboratoire de physique des rayons x, rue Lord-Byron à Paris.

ganisation atomisée du XIXe siècle et n'a pas encore réalisé son unification, comme en Allemagne.[3] Le champ est divisé entre, d'un côté, les physiciens-mathématiciens, dont les plus éminents représentants sont Marcel Brillouin (le père de Léon), Gabriel Lippmann et, bien entendu, Henri Poincaré, et, de l'autre, les physiciens-expérimentateurs, tels Aimé Cotton, Charles Fabry, ou Henri Becquerel. Ces deux mondes évoluent selon leurs propres normes, revues, institutions et laboratoires. Très schématiquement, les expérimentateurs s'intéressent peu aux nouveaux modèles et sont méfiants envers les nouvelles théories qu'ils jugent souvent trop spéculatives, ou formulées dans un for-

3. Michel Atten, « La physique en souffrance, 1850-1914 », in *La formation polytechnicienne, 1794-1994*, sous la dir. de Bruno Belhoste, Amy Dahan Dalmedico et Antoine Picon (Paris : Dunod, 1994), 217-244.

malisme mathématique trop abstrait pour qu'ils puissent les mobiliser dans l'interprétation des résultats de leurs expériences. Les physiciens-mathématiciens suivent quant à eux une démarche principalement déductive. D'un tempérament plutôt conservateur lorsqu'il s'agit d'émettre de nouvelles hypothèses physiques, leurs investigations concernent en priorité l'axiomatisation de théories déjà établies et l'élaboration de modèles généraux. Entre ces deux grands courants, il n'y a que peu de place pour ceux qui ne s'intéressent qu'à la théorie physique en tant que telle. Cette scission de la physique et surtout le rattachement de la théorie aux mathématiques sont, d'après Dominique Pestre, les principales raisons de la stagnation de la physique théorique française pendant cette première moitié du XXe siècle après son âge d'or du XIXe. La distance avec les expérimentateurs ne permet pas d'impulser les grands bouleversements théoriques, pourtant nécessaires, qui donnent naissance à la mécanique quantique et à la relativité.

En qualité de premiers physiciens-théoriciens, de Broglie et Brillouin préfigurent le renouvellement de la physique théorique en France. Ce n'est pas par hasard s'ils sont les principaux contributeurs français à la théorie des quanta. Ils sont les précurseurs des physiciens-théoriciens, pour reprendre la catégorisation de Pestre, dont la première génération voit le jour à la toute fin des années 1920 avec Alexandru Proca, Louis Goldstein et Jacques Solomon.[4]

Alors que de Broglie mobilise jusque-là des modèles déjà existants dans ses recherches théoriques, principalement ceux de Bohr et Sommerfeld, un tournant s'effectue à partir de 1922 lorsqu'il s'intéresse à la structure de la lumière. Il entame un programme de recherche plus personnel de synthèse entre les aspects corpusculaire et ondulatoire de la matière par la réunion de deux théories classiques, l'optique de Fresnel et la mécanique des points matériels. Ce programme constitue le véritable fil rouge de ses recherches. La première étape consiste en l'hypothèse des ondes de matière formulée dans sa thèse de doctorat, soutenue en décembre 1924 en Sorbonne,[5] qui le mènera jusqu'à la théorie de la double solution.

1.1.2 | L'hypothèse des ondes de matière

La thèse de physique de Louis de Broglie demeure célèbre pour sa généralisation de la dualité onde-corpuscule – d'abord théorisée pour le photon par Einstein en 1905 pour expliquer l'effet photo-électrique – aux particules dotées d'une masse. L'histoire

4. À propos de ce cloisonnement de la physique en France et ses conséquences sur la production scientifique, sans pour autant amoindrir la particularité de Louis de Broglie dans ce paysage scientifique, les conclusions de Pestre peuvent néanmoins être nuancées. Voir la discussion dans le chapitre 2 de la thèse de doctorat d'Adrien Vila Valls, « La spécificité de la physique théorique en France avant l'émergence de mécanique quantique » : Adrien Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960) » (thèse de doct., Université Claude Bernard Lyon 1, 2012), 23–45.

5. Louis de Broglie, « Recherches sur la théorie des quanta » (thèse de doct., Faculté des Sciences de Paris, 1924).

retient surtout la formule $\lambda = \frac{h}{p}$ qui associe à toute particule d'impulsion p une longueur d'onde λ, grandeurs reliées par la constante de Planck h. Toutefois, cette formule n'est en réalité que le point d'orgue d'une thèse qui s'inscrit dans un cadre théorique beaucoup plus large, celui de la « mécanique ondulatoire». Cette dénomination résume à elle seule tout le projet de son auteur, l'unification des propriétés ondulatoire et corpusculaire de la matière. Il situe ainsi pleinement ses travaux dans la continuité de l'analogie opérée par Hamilton en 1833 entre les principes de Maupertuis, en mécanique, et de Fermat, en optique, démontrant que les trajectoires des rayons lumineux décrits par l'optique géométrique peuvent être comprises indifféremment comme les trajets des particules de lumière dans une interprétation corpusculaire, ou bien comme les surfaces du front d'onde dans une interprétation ondulatoire.[6]

Chez de Broglie, la première étape de cette unification passe par la naissance du concept d'« onde de phase» qui associe à chaque corpuscule une onde qui le guide. C'est à partir de celle-ci que de Broglie va déduire l'équivalence entre la mécanique et l'optique, c'est-à-dire entre les principes de moindre action de Maupertuis et de Fermat.

L'onde de phase

De Broglie prend pour hypothèse de départ l'égalité entre, d'une part, la relation de Max Planck de 1900 de quantification de l'énergie transportée par les photons et, d'autre, part l'énergie relativiste d'un corpuscule au repos de masse propre m_0 :

> On peut concevoir que par suite d'une Grande loi de la Nature, à chaque morceau d'énergie de masse propre m_0 soit lié un phénomène périodique de fréquence ν_0 telle que l'on ait :
>
> $$h\nu_0 = m_0 c^2$$
>
> [...] Cette hypothèse est la base de notre système : elle vaut, comme toutes les hypothèses, ce que valent les conséquences qu'on peut en déduire.[7]

De Broglie pousse jusqu'à ses conclusions logiques l'hypothèse de Planck et Einstein qui ont doté les phénomènes électromagnétiques d'un comportement corpusculaire. Ce qui est vrai pour les ondes devrait inversement l'être pour les corpuscules, c'est-à-dire qu'ils devraient être le siège d'un phénomène ondulatoire. Conceptuellement, de Broglie franchit un pas important si l'on se rappelle qu'à l'origine, la quantification de Planck n'est pour son auteur qu'une hypothèse mathématique sans signification physique. Selon de Broglie, la généralisation de la dualité onde-corpuscule est la nouvelle ontologie physique, la nouvelle « Grande Loi de la Nature» principielle,

6. Sur l'œuvre de Hamilton, voir : Thomas L. Hankins, *Sir William Rowan Hamilton* (Baltimore, MD : Johns Hopkins University Press, 1980).
7. de Broglie, « Recherches sur la théorie des quanta», 33.

élevée au rang d'hypothèse physique fondamentale à partir de laquelle les autres propriétés de la matière seront déduites.

En partant de l'égalité entre les relations de Planck et d'Einstein, de Broglie inscrit dès le départ ses recherches dans un cadre exclusivement relativiste. Il cherche logiquement à déterminer le comportement d'un « morceau d'énergie» en mouvement en prenant en compte les effets relativistes. Selon les transformations de Lorentz, l'énergie doit augmenter avec la vitesse alors que la fréquence interne doit elle décroitre. De Broglie en conclut à l'existence de deux ondes de fréquences différentes. La première, $\nu_1 = \frac{m_0c^2}{h}\sqrt{1-\beta^2} < \nu_0$ (avec $\beta = v/c$), est la fréquence interne ν_0 mesurée par un observateur dans un référentiel fixe. Elle correspond à la propriété de la dilatation du temps de la relativité restreinte. La seconde, $\nu = \frac{1}{h}\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} > \nu_0$, est obtenue par l'application de la transformation de Lorentz à l'énergie du système.

Mathématiquement, la différence entre ces deux fréquences est la place du facteur de Lorentz $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, tantôt au numérateur, tantôt au dénominateur. Il s'agit pour de Broglie de comprendre le lien qui unit ces deux fréquences attachées au même phénomène et, par extension, des ondes qui leur sont associées. Il remarque que si ces ondes sont en phase à un instant initial, cet accord persiste au cours du temps. Il nomme cette propriété « théorème d'harmonie des phases» :

> Le phénomène périodique lié au mobile et dont la fréquence est pour l'observateur fixe égale à $\nu_1 = \frac{m_0c^2}{h}\sqrt{1-\beta^2}$ paraît à celui-ci constamment en phase avec une onde de fréquence $\nu = \frac{1}{h}\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$ se propageant avec la vitesse $V = \frac{c}{\beta}$

Ce théorème signifie, en langage relativiste, que la phase d'une onde est invariante par transformation de Lorentz : $\nu_0 t_0 = \nu\left(t - \frac{l}{V}\right)$. La vitesse V étant supérieure à la vitesse de la lumière, l'onde de fréquence ν ne peut transporter de l'énergie. Pour cette raison, de Broglie la qualifie dans ses premières communications d'« onde fictive» pour ensuite préférer l'appellation d'« onde de phase».[8]

Afin d'illustrer le lien unissant ces deux ondes, de Broglie imagine un disque de très grand rayon sur lequel seraient attachés des systèmes périodiques identiques, constitués d'un ressort et d'un poids, qui oscillent avec la même amplitude et la même phase.[9] La densité des systèmes augmente très fortement lorsque l'on s'approche du centre du disque, modélisant la forte concentration d'énergie d'une particule dans un espace réduit. Ce disque est animé d'un mouvement rectiligne uniforme à la vitesse $v = \beta c$ pour un observateur extérieur. Pour un observateur lié au plateau, les centres de gravité des poids dessinent un plan qui monte et qui descend à la fréquence propre ν_0.

8. Olivier Darrigol, «The Origin of Quantized Matter Waves», *Hist. Stud. Nat. Sci.* 16, n° 2 (1986) : 204.
9. de Broglie, « Recherches sur la théorie des quanta», 36-37.

L'observateur extérieur qui suit des yeux l'un des poids en mouvement le verra osciller à la fréquence $\nu_1 < \nu_0$ (dilatation du temps). S'il examine l'ensemble des poids, ceux-ci sont désynchronisés en raison de la relativité de la simultanéité. Ils décrivent une surface cylindrique dont les sections perpendiculaires au plateau sont des sinusoïdes. Cette surface se déplace à la vitesse $V = c/\beta$ parallèle à la vitesse v et supérieure à la vitesse de la lumière, elle correspond à la vitesse de l'onde de phase. Pour l'observateur extérieur qui maintiendrait son regard sur un point d'abscisse fixe de cette surface, il la verrait osciller horizontalement à la fréquence de l'onde de phase ν, supérieure à ν_0. En outre, la moyenne géométrique des vitesses de translation des mobiles et de l'onde de phase est la vitesse de la lumière, puisque $V = c/\beta = c^2/v$ et donc $vV = c^2$. La vitesse v est alors une vitesse de groupe, ce qui confirme qu'elle est, en accord avec l'optique ondulatoire classique, celle du déplacement de l'énergie. Le schéma 1.2 représente les vitesses de groupe $\boldsymbol{v}$ et de phase $\boldsymbol{V}$.

En associant au mouvement mécanique la propagation d'une onde de phase, de Broglie soupçonne la possible unité entre la dynamique et l'optique. Il théorise cette unité dans le chapitre II de sa thèse de doctorat en démontrant l'équivalence des principes variationnels de Maupertuis et de Fermat qui définissent respectivement les trajectoires des points matériels et des rayons optiques.

L'équivalence des principes de Maupertuis et de Fermat

Dans ce second chapitre, de Broglie commence par quelques rappels de mécanique, notamment sur le passage du principe de moindre action sous sa forme hamiltonienne à sa forme tronquée maupertuisienne. Ce principe, tel que formulé par Hamilton en 1834–1835, s'écrit :

$$\delta S = \delta \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} \mathrm{d}t = 0 \tag{1.1}$$

Dans lequel $\mathcal{L} = E_c - E_p$ est le lagrangien qui correspond, classiquement, à la différence entre l'énergie cinétique (E_c) et l'énergie potentielle (E_p). La fonction S, appelée action, correspond à la sommation du lagrangien le long de tous les trajets pris entre deux instants t_1 et t_2. Le principe de Hamilton est un principe variationnel. Il stipule que les seuls chemins que peut emprunter un système sont ceux pour lesquels l'action S est stationnaire ($\delta S = 0$). Une première version du principe de moindre action est formulée par Maupertuis en 1744 :[10]

$$\delta S_0 = \delta \int_{t_1}^{t_2} 2E_c \mathrm{d}t = \delta \int_a^b m\boldsymbol{v}\mathrm{d}\boldsymbol{l} = 0 \tag{1.2}$$

Celle-ci est moins générale, car elle définit seulement les formes générales des trajectoires entre deux points à énergie constante (ellipse, ligne droite, etc.) quand Hamilton

10. Avec $2E_c dt = mvvdt = mv\frac{dl}{dt}dt$

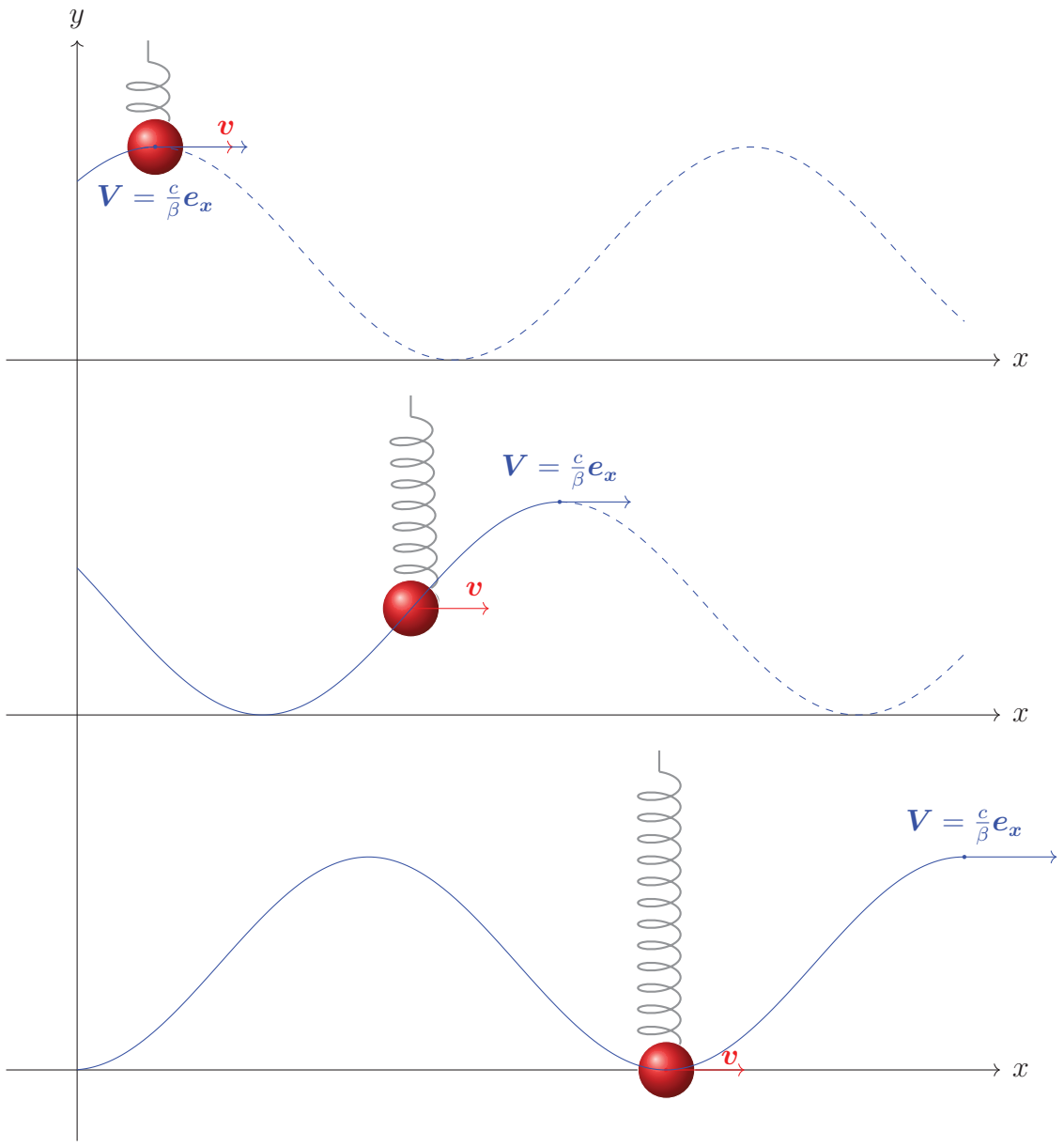


Fig. 1.2: Représentation du morceau d'énergie oscillant à la fréquence ν_1 et qui se déplace à la vitesse $\boldsymbol{v}$, ainsi que l'onde de phase qui l'accompagne qui se déplace à la vitesse $\boldsymbol{V}$. Bien que la vitesse $\boldsymbol{V} >> \boldsymbol{v}$, les deux oscillations demeurent constamment en phase.

donne les trajectoires explicites au cours du temps et ne requiert pas la conservation de l'énergie.[11]

De Broglie applique ensuite le principe variationnel à un électron relativiste de charge électrique e soumis à un champ électromagnétique représenté par son quadri-vecteur $\varphi^\mu = \left(\psi, -a^1, -a^2, -a^3\right)$.

Son lagrangien relativiste est

$$\mathcal{L}\mathrm{d}t = \left(-m.c^2.\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} - e\psi(\boldsymbol{r},t) + e.\boldsymbol{v}\cdot\boldsymbol{a}(\boldsymbol{r},t)\right)\mathrm{d}t = \left(-m_0c - e\varphi_\mu u^\mu\right)\mathrm{d}s$$

où $u^\mu = \left(\frac{ct}{\mathrm{d}s}; -\frac{\mathrm{d}x^1}{ds}; -\frac{\mathrm{d}x^2}{ds}; -\frac{\mathrm{d}x^3}{ds}\right)$ est le 4-vecteur vitesse de pseudo-norme $u_\mu u^\mu = 1$ et $ds = \sqrt{\mathrm{d}x_\mu \mathrm{d}x^\mu}$ l'élément infinitésimal de temps propre.

L'action S à minimiser est celle entre deux coordonnées d'espace-temps P et Q :

$$S = \int_P^Q \left(-m_0c - e\varphi^\mu u_\mu\right)\mathrm{d}s = \int_P^Q \left(-m_0cu_\mu - e\varphi_\mu\right)u^\mu \mathrm{d}s \tag{1.3}$$

En posant $J_\mu = -m_0cu_\mu - e\varphi_\mu$ qui est égal au signe près au 4-vecteur énergie-impulsion $p^\mu = \left(\frac{W}{c}, -\frac{m_0v^i}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - ea^i\right)$ pour une particule soumise à un champ électromagnétique et puisque pour un système conservatif la variation de l'énergie est nulle et ne joue donc aucun rôle dans l'intégrale, de Broglie peut réduire le principe de moindre action à une forme maupertuisienne :

$$\delta S_0 = \delta\int_P^Q J^\mu \mathrm{d}x_\mu = \delta\int_A^B p^i \mathrm{d}x_i = 0 \tag{1.4}$$

Ensuite, de Broglie applique le principe de Hamilton à la phase $\varphi = 2\pi\nu(t - l/V)$ d'une onde sinusoïdale. En optique, les lignes d'univers possibles entre deux points de l'espace-temps P et Q sont celles orthogonales aux surfaces d'équiphase. Parmi cette infinité de lignes d'univers, de Broglie précise que « la théorie des ondulations telle qu'elle résulte notamment des travaux d'Huyghens et de Fresnel nous apprend à distinguer parmi ces lignes certaines d'entre elles dont les projections sur l'espace d'un observateur sont pour lui les rayons au sens usuel de l'optique. » En pratique, elles correspondent au principe variationnel appliqué à la différentielle de la phase entre deux points de l'espace temps P et Q :

$$\delta\int_P^Q \mathrm{d}\varphi = 0 \tag{1.5}$$

De plus, comme la phase est un invariant relativiste, sa différentielle totale peut

11. On passe du principe de Hamilton à celui de Maupertuis en posant $\mathcal{L} = 2E_c - E$ avec $E = E_c + E_p$. Comme l'énergie totale E est constante $\delta\int_{t_1}^{t_2} E\mathrm{d}t = 0$.

être écrite sous la forme d'un quadriscalaire $d\varphi = 2\pi(\nu dt - \frac{\nu}{V})dl = 2\pi O_\mu \mathrm{d}x^\mu$ où O^μ est le 4-vecteur d'onde de composantes $(\frac{\nu}{c}, \frac{\nu}{V}\cos\left(x^i, l\right))$. En considérant que la fréquence de l'onde est constante, l'intégrale peut encore se ramener à sa forme maupertuisienne :

$$\delta \int_P^Q O_\mu \mathrm{d}x^\mu = \delta \int_A^B \frac{\nu}{V} \mathrm{d}l = 0 \tag{1.6}$$

Cette intégrale coïncide avec le principe de Fermat de l'optique géométrique. La relation de Planck $W = h\nu$ peut s'écrire, suivant les notations introduites par de Broglie, $O_0 = \frac{1}{h} J_0$. Par extension de cette relation aux composantes spatiales, de Broglie conclut à la relation qui portera son nom :[12]

$$O_i = \frac{1}{h} J_i \tag{1.7}$$

Enfin, de Broglie conclut en reformulant le principe de Fermat d'après la relation précédente :

$$\delta \int_A^B J_i \mathrm{d}x^i = \delta \int_A^B p_i \mathrm{d}x^i = 0 \tag{1.8}$$

D'où il énonce le théorème suivant :

> Le principe de Fermat appliqué à l'onde de phase est identique au principe de Maupertuis appliqué au mobile ; les trajectoires dynamiquement possibles du mobile sont identiques aux rayons possibles de l'onde

Dans les chapitres III et IV de sa thèse, de Broglie applique sa théorie à des cas concrets. Un des résultats les plus intéressants est la démonstration de la condition de stabilité des trajectoires de l'électron dans l'atome de Bohr. De Broglie retrouve cette condition de stabilité en montrant qu'elle équivaut à ce que l'onde de phase entre en résonance avec elle-même. Sa nouvelle théorie lui permet également de réinterpréter les lois de la physique statistique en démontrant la loi de Maxwell-Boltzmann.[13] Il manque de peu de découvrir les statistiques de Bose-Einstein avant l'heure, à cause d'une erreur dans son application de la loi de distribution de Gibbs.[14]

12. Celle-ci peut être ramenée à sa forme plus communément citée dans la littérature $p_i = \hbar k_i$ en posant $k_i = 2\pi O_i$
13. Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960) », 56-60.
14. Darrigol, « The Origin of Quantized Matter Waves », 206–207.

1.1.3 La réception et la diffusion des travaux de Louis de Broglie

En qualité d'hypothèse révolutionnaire, celle des « ondes de matières» est accueillie, en France, avec un mélange d'enthousiasme et de scepticisme.[15] C'est le sentiment partagé par le jury de thèse, composé d'Élie Cartan, Jean Perrin, Charles Mauguin et Paul Langevin qui en est également le directeur. Le travail de Louis de Broglie est évalué excellent. Doter la matière d'un comportement ondulatoire est audacieux et, de surcroit, exposé brillamment par l'auteur. Toutefois, aussi belle qu'elle puisse paraître, l'hypothèse est encore à l'état de spéculation. Parmi l'ensemble des membres du jury, Langevin est celui qui considère le plus sérieusement les idées de de Broglie. Dans le rapport qu'il rédige sur la thèse, il souligne que :

> Le travail de M. Louis de Broglie représente un important effort vers la solution du problème le plus important de la physique actuelle, la synthèse des deux théories optiques des ondulations et des quanta, jusqu'ici contradictoires au moins en apparence, dont chacune s'appuie sur tout un ensemble de faits et de confirmations expérimentales remarquables et dont l'opposition vient de renouveler de manière imprévue l'ancien conflit de l'émission et des ondulations.[16]

Langevin contribue d'ailleurs pour une bonne part à la diffusion de la thèse à l'étranger, en particulier en l'envoyant à son ami Albert Einstein.

Einstein saisit rapidement l'importance de l'hypothèse de la dualité onde particule. Il l'utilise dès 1924 dans sa théorie des gaz parfaits monoatomiques, que l'on appelle maintenant les statistiques de Bose-Einstein. Les fluctuations statistiques dans les gaz font apparaitre deux termes qu'il interprète comme deux contributions distinctes, ondulatoire et corpusculaire. Grâce à Einstein, la thèse va continuer à circuler et atteindre le laboratoire de Paul Dirac en Angleterre, mais surtout celui de Max Born à Göttingen. Les ondes de matières sont d'abord ignorées à Göttingen. Born est convaincu de la nature corpusculaire de la matière. Dans le même bâtiment de l'université, James Franck et ses assistants réalisent des expériences de collisions d'électrons dans des gaz, pour lesquelles il reçoit, avec Gustav Hertz, le prix Nobel en 1925. Cependant, la théorie des gaz d'Einstein finit par convaincre Born de l'utilité des ondes de de Broglie. Il encourage son étudiant Walter M. Elsasser, tout juste âgé de 21 ans, à creuser l'hypothèse que deux anomalies expérimentales pourraient trouver une explication grâce à

15. À propos de la réception de la thèse de Louis de Broglie et plus généralement sur les premiers travaux du physicien, le lecteur peut se référer au chapitre 2 intitulé « Louis de Broglie, retour sur le parcours d'un physicien» de la thèse de doctorat d'Adrien Vila Valls dont la présente partie est dans une large mesure une synthèse, agrémentée de quelques autres références complémentaires. Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960)», 46-109.

16. Bernadette Bensaude-Vincent, *Langevin, 1872–1946 : Science et vigilance* (Paris : Belin, 1987), 161 ; Cité dans : Olival Freire Jr., «L'interprétation de la mécanique quantique selon Paul Langevin», *La Pensée* 292 (1993) : 118.

la propriété de diffraction des ondes induite par le comportement ondulatoire de la matière : la première, l'effet Ramsauer de diffusion des électrons de faibles énergies par des atomes d'un gaz noble, et, la deuxième, concernant la détection par Clinton Davisson et Charles Kunsman d'intensités anormales à certains angles lors de la réflexion d'électrons par une plaque métallique.[17] Elsasser se consacre à la mise en évidence expérimentale directe des ondes de matière en imaginant un dispositif de diffraction. Malheureusement incapable de rassembler une équipe pour l'aider dans cette tâche, il se résigne et abandonne avant d'atteindre son but. L'expérience d'Elsasser est toutefois indépendamment réalisée par deux équipes en 1927 : aux États-Unis, par Davisson et son assistant Lester Germer du laboratoire Bell ; un mois plus tard en Écosse, par George Paget Thomson et son collègue Alexander Reid. La découverte de la nature ondulatoire de l'électron vaut à de Broglie le prix Nobel de physique en 1929. Thomson et Davisson le recevront également conjointement pour sa mise en évidence expérimentale.[18]

La thèse de de Broglie arrive également entre les mains de l'Autrichien Erwin Schrödinger à Zürich à l'automne 1925.[19] Celui-ci applique les idées développées par de Broglie aux gaz et aux atomes. Il franchit une étape décisive dans l'élaboration de la mécanique quantique en proposant une équation gouvernant les ondes de matières. Il introduit également le concept de paquet d'onde pour représenter les atomes. Comme de Broglie, Schrödinger pense sa théorie comme une extension de la mécanique classique et dans laquelle l'analogie de Hamilton joue également un rôle central (voir la section 1.1.2 page 16).[20] Schrödinger s'intéresse cependant aux ondes stationnaires quand de Broglie se focalise sur leur propagation dans l'espace. La première équation d'onde établie par Schrödinger est relativiste, mais, incapable de rendre compte des états d'énergie de l'atome d'hydrogène, il ne la publie pas, au contraire de son homologue non relativiste qui s'accorde quant à elle parfaitement avec le spectre observé expérimentalement.[21] Ainsi, Schrödinger obtient une première équation d'onde non relativiste indépendante du temps qu'il généralise ensuite en la dotant d'une dépen-

17. Mara Beller, « Born's Probabilistic Interpretation : A Case Study of "Concepts in Flux" », *Stud. Hist. Philos. Sci. A* 21, n° 4 (1990) : 569-570.

18. Jagdish Mehra et Helmut Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 1 : The Historical Development of Quantum Theory : Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld Its Foundation and the Rise of Its Difficulties* (New York City, NY : Springer Verlag, 1982), 626-627.

19. Helge Kragh, « Erwin Schrödinger and the Wave Equation : The Crucial Phase », *Centaurus* 26, n° 2 (1982) : 155–158.

20. Christoph Lehner et Christian Joas, « The classical roots of wave mechanics : Schrödinger's transformations of the optical-mechanical analogy », *Stud. Hist. Philos. Sci. B* 40, n° 4 (2009) : 338-351.

21. Concernant la genèse de l'équation de Schrödinger, outre la référence précédente, voir : Walter Moore, *Schrödinger : Life and thought* (Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1989), 191–207.

dance temporelle lui conférant sa forme actuelle :[22]

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(\boldsymbol{r},t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(\boldsymbol{r},t)\right]\psi(\boldsymbol{r},t) \tag{1.9}$$

La puissance du formalisme de Schrödinger réside dans sa capacité à déterminer les niveaux d'énergie quantifiés de l'atome d'hydrogène par la simple résolution d'un problème de valeurs propres, allégeant grandement le traitement mathématique. Ces valeurs propres associées à l'onde ψ correspondent aux différents états d'énergie possibles de l'atome dont Schrödinger note qu'elles s'accordent remarquablement bien avec l'expérience.

De Broglie n'est pas convaincu par l'équation d'onde de Schrödinger. Il est en désaccord avec l'interprétation purement ondulatoire de son auteur qui évacue la dynamique des points matériels. De plus, la définition de l'équation de Schrödinger dans l'espace de configuration à $3N$ dimensions (où N est le nombre de particules) est contraire à sa conception d'une évolution dans l'espace tridimensionnel des objets quantiques qu'il souhaite maintenir. En outre, l'équation est non-relativiste alors que la covariance relativiste est centrale dans la mécanique ondulatoire broglienne. En fait, de Broglie est ignorant de la première tentative de Schrödinger d'établir une équation relativiste.

Ensuite, si de Broglie s'accorde avec l'interprétation probabiliste de Born de la fonction d'onde selon laquelle le carré de ses solutions renseigne des probabilités de présence des particules, il refuse, au contraire de Born, d'abandonner la possibilité d'une description de l'évolution déterministe des phénomènes individuels héritée de la mécanique classique. Le point matériel est une réalité et il s'agit pour de Broglie d'en déterminer les lois du mouvement dans le cadre de la nouvelle physique.

C'est donc de cette double problématique, celle de la caractérisation de lois qui rendent compte à la fois des aspects ponctuel et étendu des particules, initiée dans sa thèse par l'équivalence entre les principes de Maupertuis et de Fermat, tout en maintenant leur évolution déterministe dans l'espace à trois dimensions, que de Broglie va donner naissance entre 1926 et 1927 aux théories de la double solution et à sa version simplifiée, l'onde pilote. Ces deux théories jumelles constituent la première version de ce que les physiciens appelleront par la suite l'ICMQ, après la redécouverte de la théorie par Bohm de manière tout à fait autonome en 1951 (voir la section 1.2 page 41). Deux théories qui s'inscrivent dans la continuité des recherches de de Broglie entreprises dans sa thèse, mais dont la direction s'écarte cependant, sans qu'il n'en ait encore pleinement conscience à cause de ses faibles contacts avec la communauté internationale, du courant dominant en physique en provenance de Copenhague et Göttingen.

22. Erwin Schrödinger, « An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules », *Phys. Rev.* 28, n° 6 (1926) : 1049-1070.

1.1.4 Les théories de la double solution et de l'onde pilote

Dans sa thèse de doctorat, de Broglie représente les particules par des ondes monochromatiques. Pour cette raison, seule la phase possède une signification physique réelle. L'amplitude, constante, indique que le corpuscule peut se situer en tout point de l'espace avec une égale probabilité. Afin de doter la particule d'une position privilégiée, de Broglie remplace l'amplitude constante par une fonction à singularité. C'est le sens du terme « double solution ». Celle dotée d'une amplitude constante, que l'on retrouve dans la fonction d'onde habituelle solution de l'équation de Schrödinger, est valable pour des calculs probabilistes. Cependant, une deuxième fonction à singularité s'ajoute à cette première qui décrit le mouvement réel des particules selon leurs positions et leurs vitesses. L'enjeu théorique pour de Broglie est de démontrer que ces deux fonctions, bien que d'amplitudes différentes, possèdent une phase identique.

De Broglie commence par appliquer le principe d'une amplitude à singularité pour les photons. Dans une note succincte de 1926, il explique les phénomènes de diffraction et d'interférences de la lumière, bien connus de l'optique ondulatoire classique, dans le cadre de la mécanique ondulatoire.[23] Il part de l'équation d'onde de d'Alembert $\Delta u = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$, mais il substitue à la solution habituelle $u = a(x, y, z)\,\mathrm{e}^{i\omega[t-\varphi(x,y,z)]}$ une solution de la forme $u = f(x, y, z, t)\,\mathrm{e}^{i\omega[t-\varphi(x,y,z)]}$. Dans les deux solutions, la phase φ est identique. Par contre, alors que a est continue, la fonction f comporte des singularités qui définissent ce que de Broglie nomme les « quanta d'énergie radiante » qui se déplacent le long des fronts d'onde, c'est-à-dire dans une direction normale aux surfaces $\varphi = constante$. En considérant que la fonction f possède une symétrie sphérique (la singularité croit de manière inversement proportionnelle au rayon), il définit la vitesse en un point M par la formule $U = c^2\left(\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right)_M$, où n est une variable d'espace passant par M. La phase φ joue alors le rôle d'un potentiel de vitesses. En considérant que le flux de photons est conservatif le long d'un tube de section σ et de densité volumique ρ, de Broglie obtient l'expression $\rho = K \times a$ (avec K et a constants). Il en déduit que la densité ρ des quanta de lumière est proportionnelle à l'intensité de la théorie classique. De Broglie prolonge aux particules massives la représentation de l'aspect corpusculaire comme une singularité d'un phénomène étendu dans un second article, « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement » publié en 1927 au *Journal de Physique et le Radium*, qui présente la version la plus aboutie de la théorie de la double solution.[24] À l'instar de sa théorie des photons, il considère deux solutions pour les équations de la mécanique ondulatoire. La première solution

23. Louis de Broglie, « Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférences et de diffraction à la théorie des quanta de lumière », *CRAS* 183 (1926) : 447-448.

24. Louis de Broglie, « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement », *JPR* 8, n° 5 (1927) : 225-241.

$u = f(x, y, z, t) \cos \frac{2\pi}{h} \varphi$ est la solution véritablement physique. Elle possède une singularité à l'endroit où est localisé le corpuscule. La seconde solution $\psi = a(x, y, z) \cos \frac{2\pi}{h} \varphi'$ est une onde régulière. Elle informe sur l'évolution statistique d'un ensemble de particules et se confond avec la solution de l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique. L'équation fondamentale utilisée par de Broglie dans sa dynamique n'est pas celle de Schrödinger, mais celle que l'on appelle maintenant de « Klein-Gordon » :

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2 \psi(\boldsymbol{r}, t)}{\partial t^2} = \left[-\hbar^2 c^2 \nabla^2 + m^2 c^4\right] \psi(\boldsymbol{r}, t) \tag{1.10}$$

Il dérive cette équation de ses propres travaux sur la mécanique ondulatoire dans une première version en 1925. En fait, cette équation est, entre 1925 et 1927, connue et utilisée indépendamment par de nombreux physiciens parmi lesquels Schrödinger, Pauli, Dirac, Klein, Gordon, Fock et Kaluza.[25]

Ce choix est cohérent avec l'orientation relativiste de l'ensemble de ses travaux sur les quanta. Cette équation est, pense-t-on à l'époque, une bonne candidate pour décrire les électrons relativistes.[26] Elle est en outre réelle, à la différence de l'équation de Schrödinger, ce qui est un argument supplémentaire pour de Broglie qui utilise les nombres complexes uniquement à des fins de commodités calculatoires et élimine systématiquement les parties imaginaires des solutions finales.

De Broglie s'intéresse dans un premier temps à la dynamique du point matériel isolé, ainsi qu'aux ensembles (« nuage» selon sa propre terminologie) de points sans interactions mutuelles. Pour chacun de ces cas, il considère le mouvement libre et en présence d'un champ extérieur. Dans un second temps, il esquisse une théorie des particules en interactions mutuelles, ce qui n'est pas sans soulever de sérieuses difficultés théoriques.

La première partie, sur les électrons libres, est dans l'essentiel identique à la théorie du photon. De Broglie approfondit celle-ci en recherchant des formes explicites de la fonction f à symétrie sphérique. Le point le plus important est la double interprétation qu'il donne à la quantité $\rho = K \times a$, selon que la fonction continue ψ décrit un ensemble de points ou un corpuscule unique. Dans le premier cas, il s'agit de la densité du nuage de points alors que dans le second, $a^2 dv$, de la probabilité de trouver le corpuscule dans l'élément de volume dv. Cette seconde interprétation est identique à celle probabiliste de Born, à la nuance près que de Broglie parle bien de probabilité de *présence* et pas de *mesure*, soulignant une interprétation ontologique du formalisme mathématique et non positiviste.

25. Helge Kragh, «Equation with the many fathers . The Klein – Gordon equation in 1926», *American Journal of Physics* 52, n° 11 (1984) : 1024-1033.

26. Il est maintenant établi que l'équation de Klein-Gordon n'est valable que pour les bosons relativistes de spin 0. Les électrons relativistes sont pour leur part correctement décrits par l'équation de Dirac.

La relation de guidage et le principe de la double solution

Dans un second temps, de Broglie considère les particules sous l'influence d'un potentiel constant puis variable.[27] L'équation du système, sous l'influence d'un potentiel indépendant du temps F, est (en substituant u à sa forme polaire $u = f\,\mathrm{e}^{\left(i\frac{\varphi}{h}\right)}$) :

$$\Delta u - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{4\pi i}{h}\frac{F(x,y,z)}{c}\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{4\pi^2}{h^2}\left[m_0^2c^2 - \frac{F^2}{c^2}\right]u = 0 \tag{1.11}$$

Il sépare ensuite les parties réelle et imaginaire et aboutit à un système de deux équations différentielles. En notant la phase sous sa forme relativiste $\varphi = Wt - \varphi_1$, il réécrit la partie réelle sous la forme (la partie temporelle Wt n'intervenant pas dans l'équation différentielle) :

$$\frac{1}{f}\Box f = \frac{4\pi^2}{h^2}\left[\sum_{x,y,z}\left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial x}\right)^2 - \frac{1}{c^2}(W-F)^2 + m_0^2c^2\right] \tag{1.12}$$

Cette équation est identique à l'équation de Hamilton-Jacobi relativiste au terme $\frac{1}{f}\Box f$ près. À partir de cette remarque, de Broglie émet une hypothèse fondamentale pour sa théorie : à l'instar de la mécanique préquantique, il *admet* que la vitesse de la particule est dirigée dans le sens du gradient de φ_1. Cette vitesse en un point M est donnée par l'expression :

$$\boldsymbol{v_M} = c^2\frac{\boldsymbol{\nabla}\varphi_1}{W-F} \tag{1.13}$$

C'est l'équation de guidage qui devient, à l'approximation newtonienne, en simplifiant l'énergie $E = W - F \approx m_0c^2$:

$$\boldsymbol{v_M} = \frac{\boldsymbol{\nabla}\varphi_1}{m_0} \tag{1.14}$$

Pour la description d'un ensemble de points sans interactions mutuelles, de Broglie utilise la solution continue $\psi = a(x,y,z)\cos\frac{2\pi}{h}\varphi'$, avec $\varphi' = \frac{2\pi}{h}(\nu t - \varphi_1'(x,y,z,t))$, dont le carré de l'amplitude est selon de Broglie proportionnel à la densité de particules par unité de volume. De la même manière, il sépare les parties réelle et imaginaire dans l'équation de Klein-Gordon (1.11). La partie réelle isolée est :

$$\frac{1}{a}\Delta a = \frac{4\pi^2}{h^2}\left[\sum_{x,y,z}\left(\frac{\partial\varphi_1'}{\partial x}\right)^2 - \frac{1}{c^2}(h\nu - F)^2 + m_0^2c^2\right] \tag{1.15}$$

En comparant les équations (1.12) et (1.15), de Broglie conclut que les ondes φ_1 et φ_1'

27. Nous reproduisons ici uniquement le raisonnement pour les champs constants, celui-ci étant aisément extensible aux champs variables, nonobstant quelques difficultés mathématiques.

sont identiques. Il considère qu'il doit en être de même en contexte quantique, et donc que $\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Box f}{f}$. C'est le principe de la « double solution » :

> [Celui-ci] implique l'existence de deux solutions sinusoïdales de l'équation ayant même facteur de phase, l'une comportant une singularité ponctuelle et l'autre ayant, au contraire, une amplitude continue. Naturellement, ce principe est provisoire en ce sens qu'il doit pouvoir être confirmé ou infirmé par des raisonnements rigoureux ; mais il est fortement suggéré par la nécessité de concilier la structure atomique de la matière et de la lumière avec les succès de l'optique classique et de la théorie de Schrödinger.[28]

Il est intéressant de noter que de Broglie justifie ce principe par la nécessité d'unifier la dynamique des points et l'optique, exactement comme dans sa thèse de doctorat lorsqu'il posait l'équivalence des principes de Maupertuis et de Fermat. La partie imaginaire de l'équation (1.11) permet à de Broglie de dégager la deuxième relation fondamentale :[29]

$$\rho(x,y,z) = Ka^2(x,y,z)\left[1 - \frac{F(x,y,z)}{W}\right] \tag{1.16}$$

À l'approximation newtonienne, en négligeant l'énergie potentielle devant l'énergie totale, elle se simplifie de la façon suivante :

$$\rho(x,y,z) = Ka^2(x,y,z) \tag{1.17}$$

Dans le cas plus général de particules identiques de charge e soumises à un champ variable au cours du temps de composantes scalaire V et vectorielle $\boldsymbol{A}$, en suivant la même démarche qu'avec le champ constant et en faisant la même hypothèse sur la direction des vitesses, les deux équations de guidage (1.13) et de densité (1.16) deviennent :

$$\begin{cases} \boldsymbol{v} = c^2 \frac{\boldsymbol{\nabla}\varphi + (e/c)\boldsymbol{A}}{\partial\varphi/\partial t - e\mathcal{V}} \\ \rho(x,y,z,t) = Ka^2\left[\frac{\partial\varphi}{\partial t} - e\mathcal{V}\right] \end{cases} \tag{1.18}$$

Ces deux équations constituent le socle de la théorie de la double solution. Cependant, bien que le principe de la double solution, ou d'égalité des phases, soit démontré rigoureusement en l'absence de champ extérieur, il est cependant admis en tant qu'hypothèse en leur présence, ce qui est éminemment problématique du point de vue de la

28. de Broglie, « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement », 232.

29. La partie imaginaire est $\sum_{x,y,z} \frac{\partial a}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial \varphi_1'} + \frac{1}{2}a\Delta\varphi_1' = 0$ qu'il écrit, en tenant compte du principe de la double solution ($\varphi_1' = \varphi_1$) : $\frac{2}{a}\frac{\partial a}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial n}[\log a^2] = -\frac{\Delta\varphi_1}{\mathrm{grad}\varphi_1}$ En considérant qu'en un point donné de l'espace la densité $\rho(x,y,z)$ de particules est constante au cours du temps, elle doit localement satisfaire l'équation de continuité $\mathrm{div}\rho\boldsymbol{v} = 0$. En tenant compte de la formule de guidage (1.13), il en déduit (1.16).

rigueur mathématique. Pour cette raison, de Broglie choisit provisoirement de renoncer à la double solution en admettant l'existence *a priori* des deux ondes distinctes, ψ et u, et de postuler comme point de départ la relation qui lie la vitesse au gradient de la phase. Cette variante de la théorie, il la dénomme « onde pilote», puisque tout se passe comme si la particule matérielle était guidée par l'onde continue. Pour de Broglie, l'onde pilote est une concession provisoire qui, bien qu'évitant certaines difficultés mathématiques, dessert son programme originel, car, ajoute-t-il, « il faudra bien, sans doute, réincorporer le corpuscule dans le phénomène ondulatoire.»[30]

Les mouvements des particules en interaction

Après avoir étudié le cas des particules libres, de Broglie s'attèle en toute logique à celui de plusieurs particules en interaction. Le défi est de taille. Dès lors, les équations de la mécanique quantique ne sont pas décrites dans l'espace tridimensionnel habituel, mais dans l'espace de configuration à $3N$ dimensions. En effet, à la différence des particules libres, la fonction d'onde totale du système ne peut plus s'écrire comme le simple produit des fonctions d'onde des particules individuelles. Du point de vue réaliste de de Broglie, dans lequel l'onde u est physique, ce n'est pas admissible, car chaque particule est guidée par une onde propre. À des fins de simplification, de Broglie considère uniquement le cas des interactions entre deux particules, mais il signale que le raisonnement est aisément généralisable à N particules. Le système est décrit par les deux équations aux dérivées partielles suivantes :

$$\begin{cases} \Box\, u_1 + \frac{4\pi i}{h}\frac{V_1}{c^2}\frac{\partial u_1}{\partial t} - \frac{4\pi^2}{h^2}\left[m_1^2c^2 - \frac{V_1}{c^2}\right] u_1 = 0 \\ \Box\, u_2 + \frac{4\pi i}{h}\frac{V_2}{c^2}\frac{\partial u_2}{\partial t} - \frac{4\pi^2}{h^2}\left[m_2^2c^2 - \frac{V_2}{c^2}\right] u_2 = 0 \end{cases} \tag{1.19}$$

Pratiquement, il s'agit de trouver une fonction de Jacobi $\varphi(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2})$ pour chacune des particules de la forme :

$$m_i v_i = -\boldsymbol{\nabla}_i \varphi \qquad (i = 1, 2) \tag{1.20}$$

De Broglie se demande si, dans le cas de la mécanique quantique, à l'instar de la mécanique classique, une telle fonction existe. Afin de déterminer les fonctions de Jacobi, il fait comme si le mouvement d'une des particules était connu par avance pour déterminer la fonction d'onde de la seconde. En fixant le mouvement de la deuxième particule, la fonction continue de la première s'écrit : $\psi_1 = a_1\, \mathrm{e}^{2i\frac{\pi}{h}\varphi_1(\boldsymbol{x_1},t)}$. Sous sa forme lagrangienne, l'équation du mouvement de cette particule est $L_1 = \frac{1}{2}m_1v_1^2 - V(r) -$

30. de Broglie, « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement», 241.

$c^2\varepsilon_1(x_1, y_1, z_1)$ où $V(r)$ est le potentiel d'interaction classique entre les deux particules.[31] Dans ce lagrangien, un nouveau potentiel intervient :

$$-c^2\varepsilon_1(x_1, y_1, z_1) = \frac{h^2}{4\pi^2}\frac{\Box a}{a} \tag{1.21}$$

Ce potentiel trouve son origine de la masse propre variable de la particule $M_0 = \sqrt{m_0^2 - \frac{h^2}{4\pi^2 c^2}\frac{\Box a}{a}}$, corrigée par des effets quantiques. De Broglie procède de même pour déterminer le lagrangien de la deuxième particule. À la limite classique (c'est-à-dire quand $h \to 0$), le lagrangien total du système est la simple addition des deux termes quadratiques de l'énergie cinétique et du potentiel, puisque l'on peut négliger le potentiel $-c^2\varepsilon$:

$$L = \frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2 - V(r) \tag{1.22}$$

Dans ce lagrangien classique, les termes qui dépendent des actions mutuelles des particules (ici $V(r)$) et ceux qui n'en dépendent pas peuvent être séparés. Il pourrait en être de même pour le lagrangien de la nouvelle mécanique, à condition que les deux potentiels additionnels $-c^2\varepsilon_{1,2}$ (appelés plus tard par Bohm « potentiels quantiques») puissent s'écrire sous la forme d'un potentiel unique semblable à $V(r)$, c'est-à-dire qu'il est uniquement fonction de la distance $\|\boldsymbol{x_1} - \boldsymbol{x_2}\|$ entre les deux particules. Le lagrangien quantique serait alors le lagrangien classique additionné d'un terme $-c^2\varepsilon(r)$. En admettant cette opération possible, l'espace de configuration de l'équation de Schrödinger serait alors sans ambiguïté, puisque les six composantes des vitesses des particules individuelles seraient définies par les relations (1.20).[32] Pour de Broglie, l'utilisation de l'équation de Schrödinger n'a de sens que s'il est possible de décrire les particules dans un espace tridimensionnel. À cause de sa définition dans l'espace de configuration, elle n'est pas une équation de propagation physique, dans le sens, par exemple, de l'équation d'onde classique. Pour cette raison, de Broglie lui donne une interprétation probabiliste, à l'instar de Born : le carré de sa solution renseigne la probabilité de trouver le système dans un état donné en l'absence d'une connaissance exacte des positions initiales des particules. De Broglie ne parvient pas à donner une forme classique au lagrangien quantique, et pour cause, cette opération est impossible. Le potentiel $-c^2\varepsilon_{1,2}$ est d'ailleurs identique au potentiel quantique de l'interprétation de Bohm qui rend la

31. Qui est identique pour les deux particules puisqu'il dépend uniquement de leur distance mutuelle, autrement dit : $V(r) = V_1(\|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x_2}\|) = V_2(\|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x_1}\|)$

32. de Broglie, « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement», 239.

théorie intrinsèquement non locale.[33]

Le réalisme physique chez de Broglie est associé à une description des phénomènes dans l'espace réel à trois dimensions. Au contraire de Bohm, de Broglie, dans ses périodes réalistes (avant 1927 et après 1952), ne peut s'accommoder de l'espace de configuration comme espace fondamental dans lequel évoluent les particules. Après son retour à la théorie de la double solution, ce problème est l'un des premiers sur lequel il se penchera (voir la section 3.3 page 109).

1.1.5 Un réalisme aux antipodes de la complémentarité de Bohr

Avant de poursuivre sur la réception de la théorie de la double solution par la communauté des physiciens lors de sa présentation à l'occasion du ve Conseil Solvay, il est pertinent de faire un détour par Copenhague, principal lieu d'élaboration de la mécanique quantique avec Göttingen avant l'avènement de la Seconde Guerre mondiale. L'Institut de physique théorique de l'université de Copenhague, aujourd'hui l'Institut Niels Bohr, accueille les physiciens les plus brillants de cette génération, qui vont contribuer de manière décisive, principalement entre 1925 et 1927, à l'établissement de la théorie quantique sous sa forme définitive. Entre autres, il s'agit de Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Max Born, Pascual Jordan, Paul Dirac, Linus Pauling ou Isaac Rabi.[34] À l'exception notable de Max Born, de Broglie n'a d'ailleurs aucun contact avec ces physiciens. Dans un témoignage rétrospectif,[35] il précise que ce n'est qu'à la veille du Conseil Solvay qu'il prend connaissance des relations d'indétermination de Heisenberg de 1927 qui vont pourtant structurer les débats interprétatifs, au cœur de la célèbre polémique entre Bohr et Einstein qui démarre en 1927 pour se poursuivre tout au long des années 1930.[36]

33. En développant le potentiel au premier ordre, celui-ci s'écrit : $c^2\varepsilon = -\frac{h^2}{4\pi^2}\frac{\Box a}{a} \approx -\frac{h^2}{4\pi^2}\frac{\boldsymbol{\nabla}^2 a}{a} + \frac{h^2}{4\pi^2 c^2}\frac{\ddot{a}}{a}$. Dans le cas classique $c \to \infty$ et le second terme tend vers 0. Guido Bacciagaluppi et Antony Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads : Reconsidering the 1927 Solvay Conference* (Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2009), 61.

34. Jagdish Mehra et Helmut Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 2 : The discovery of quantum mechanics, 1925* (New York City, NY : Springer Verlag, 1982), Pour une vision d'ensemble de ces travaux, se référer aux volumes 2 à 4 de la monumentale histoire de la mécanique quantique de Mehra et Rechenberg ; Jagdish Mehra et Helmut Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 3 : The Formulation of Matrix Mechanics and Its Modifications 1925-1926* (New York City, NY : Springer Verlag, 1983) ; Jagdish Mehra et Helmut Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 4 : The Fundamental Equations of Quantum Mechanics 1925-1926. The Reception of the New Quantum Mechanics* (New York City, NY : Springer Verlag, 1983).

35. Louis de Broglie, «Souvenirs personnels sur les débuts de la mécanique ondulatoire», *Revue de la Métaphysique et de la Morale* 48, n° 1 (1941) : 1-23.

36. Pour une lecture récente du débat Bohr-Einstein, avec une bonne revue de la littérature académique sur le sujet, voir : Nicolaas Pieter Landsman, «When champions meet : Rethinking the Bohr-Einstein debate», *Stud. Hist. Philos. Sci. B* 37 (2006) : 212-242.

Au fur et à mesure que la mécanique quantique perfectionne son formalisme, le fossé se creuse avec la mécanique classique. Les changements d'états par « sauts quantiques» (*quantum leaps*) incontrôlables, en référence et en opposition au principe de continuité énoncé par Leibniz (*Natura non facit saltus*),[37] ainsi que les relations d'indétermination de Heisenberg qui empêchent toute mesure simultanée de la position et de la quantité de mouvement font ressentir le besoin d'un cadre interprétatif de la physique entièrement renouvelé. C'est dans ce contexte que nait la complémentarité en 1927 qui s'impose rapidement en tant qu'interprétation standard (ISMQ), marquant le début d'une période qualifiée par Max Jammer de « monocratie de l'interprétation de Copenhague»[38] ou encore d'« hégémonie de Copenhague» par James Cushing.[39] L'objectif de cette section est de résumer les principales idées au cœur de la complémentarité de Bohr. Cet examen permettra entre autres de comprendre la réception immédiatement négative de théorie de la double solution à Solvay.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, une mise en garde terminologique s'impose. La complémentarité est souvent accolée à l'« interprétation de Copenhague», expression usuellement employé pour dénommer l'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique qui suggère fortement une unité conceptuelle chez tous les physiciens se revendiquant de la pensée bohrienne. Or, l'historiographie contemporaine montre au contraire que « l'interprétation de Copenhague» correspond avant tout en une reconstruction *a posteriori*, principalement du fait de Heisenberg, des idées de Bohr dans les années 1950. En effet, cette appellation masque les grandes disparités entre les points de vue des principaux défenseurs de la complémentarité. Elle porte la responsabilité de nombreux malentendus sur les véritables conceptions de Bohr qui ont été assimilées pendant longtemps, à tort, à celles de Heisenberg, en particulier sur la place de l'observateur dans la réduction du paquet d'onde, réduisant la complémentarité en une variante du positivisme.[40] Pour cette raison, l'historien Don Howard préfère le terme d'« esprit» de Copenhague plutôt que d'« interprétation» dont l'expression est reléguée au rang de mythe.[41] Ces mises en garde effectuées, la synthèse qui suit de la complémentarité garde à l'esprit que la pensée de Bohr est complexe et, de surcroit, est sujette à des débats académiques que cette courte section ne peut rendre compte

37. François Duchesnau, «Leibniz on the principle of continuity», *Revue Internationale de Philosophie* 4, nº 48 (1994) : 141-160.

38. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, 250.

39. James T. Cushing, *Quantum Mechanics : Historical contingency and the Copenhagen hegemony* (Chicago, IL : University of Chicago Press, 1994).

40. Sans mentionner les divergences entre les disciples de Bohr, par exemple entre l'idéaliste Heisenberg et le marxiste Rosenfeld. Kristian Camilleri, «Bohr, Heisenberg and the divergent views of complementarity», *Stud. Hist. Philos. Sci. B* 38, nº 3 (2007) : 514-528 ; Kristian Camilleri, «Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation», *Perspectives on Science* 17, nº 1 (2009) : 26-57.

41. Don Howard, «Who Invented the "Copenhagen Interpretation" ? A Study in Mythology», *Philosophy of Science* 71, nº 5 (2004) : 669-682.

dans leur exhaustivité.[42]

Niels Bohr présente pour la première fois publiquement le principe de la complémentarité le 16 septembre 1927 au bord du lac de Côme en Italie, soit à peine plus d'un mois avant l'ouverture du Conseil Solvay. La complémentarité s'imposera rapidement comme l'interprétation par défaut de la mécanique quantique. Un résumé de la conférence est publié en avril de l'année suivante dans la revue *Nature*.[43]

Si l'on oppose traditionnellement la mécanique ondulatoire broglienne à la complémentarité bohrienne, il faut bien garder à l'esprit qu'elles ne prennent pas les mêmes questionnements comme point de départ. Chez de Broglie, ses travaux de thèse et la théorie de la double solution s'inscrivent dans une épistémologie héritière de la physique classique. Il s'agit de décrire l'évolution des phénomènes dans le cadre spatiotemporel en prenant en compte les nouvelles contraintes imposées par l'introduction de la constante de Planck et de la dualité onde-corpuscule. De là découle son programme d'unification des aspects corpusculaire et ondulatoire de la matière. Il n'y a pas de rupture épistémologique nette avec la physique classique. Dans le cas de Bohr, le centre d'attention concerne les conditions d'une description des phénomènes physiques qui doit être formulée dans un langage débarrassé de toute ambiguïté.

Le principe de complémentarité est concomitant à l'interprétation des relations entre les écarts types de la position et de l'impulsion :

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \tag{1.23}$$

découvertes par Heisenberg un peu plus tôt en 1927 dont il se veut une généralisation.[44] Heisenberg dérive ces relations à partir de la mécanique des matrices dans laquelle les observables sont des opérateurs mathématiques. Dans la mécanique des matrices, les opérateurs conjugués ne commutent pas entre eux, comme la position et la quantité de mouvement $pq - qp = -i\hbar$. Lorsque des opérateurs ne commutent pas entre eux, l'ordre dans lequel ils sont appliqués successivement sur une fonction est important. Ainsi, l'opération position suivie de celle quantité de mouvement ne donne pas le même résultat que l'opération quantité de mouvement suivie de position. Hei-

42. À propos de la pensée de Bohr, outre les références précédentes, voir : Catherine Chevalley, introduction à *Physique atomique et connaissance humaine*, par Niels Bohr, sous la dir. de Catherine Chevalley, trad. Edmond Bauer et Rolland Omnès (Paris : Gallimard, 1991) ; Pour une lecture critique de Bohr, tant du point de vue philosophique que de sa contribution au développement de la mécanique quantique, voir : Mara Beller, « The birth of Bohr's complementarity : The context and the dialogues », *Stud. Hist. Philos. Sci. A* 23, n° 1 (1992) : 147-180.

43. Niels Bohr, « The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory », *Nature* 128 (1928) : 580-590.

44. Werner Heisenberg, « Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik », *Zeitschrift für Physik* 43, n° 3 (1927) : 172-198 ; Pour une traduction anglaise de l'article original de Heisenberg, voir : John Archibald Wheeler et Wojciech Hubert Zurek, éds., *Quantum Theory of Measurement* (Princeton, NJ : Princeton University Press, 1983), 62–86.

senberg généralise cette relation à d'autres couples, tels le moment angulaire et l'angle $J\omega - \omega J = -\hbar$ ou encore le temps et l'énergie $Et - tE = -i\hbar$.[45] Pour Heisenberg, ces relations signifient l'impossibilité de mesurer simultanément et avec une précision arbitrairement grande la position et la quantité de mouvement (ainsi que tout autre couple de variables conjuguées). Elles apparaissent comme la conséquence de la discontinuité introduite par le quantum d'action $\hbar$, plus petite variation observable entre deux états du système. Heisenberg les illustre par la désormais célèbre expérience de pensée du microscope à rayons γ. Afin de déterminer la position d'un électron, il faut l'éclairer avec un photon de haute énergie. Cependant, lorsque le photon entre en collision avec l'électron, l'impulsion de ce dernier se modifie par diffusion Compton, introduisant un changement discontinu et incontrôlable de sa quantité de mouvement. Puisque d'après la relation de de Broglie $p = \frac{h}{\lambda}$ le transfert de moment est inversement proportionnel à la longueur d'onde, Heisenberg en conclut que plus la précision de la mesure de la position de l'électron est élevée, le moins l'est celle de son impulsion.

Bohr, bien qu'acceptant la démonstration mathématique de Heisenberg, en critique cependant l'esprit général. Il va même s'opposer à la publication de l'article jusqu'à ce qu'un compromis soit trouvé avec Heisenberg qui consiste en l'ajout d'un petit appendice à la fin de l'article dans lequel Heisenberg réalise son autocritique à la suite des remarques de Bohr. Bohr conteste l'approche trop formelle de Heisenberg qui ne lui a pas permis de saisir correctement le rôle de la dualité onde-corpuscule pour se restreindre uniquement à des considérations sur la mesurabilité. Il souligne que la discontinuité dans la modification de l'impulsion de l'électron n'empêche pas en soi qu'elle soit bien définie et mesurable. Dans la mécanique matricielle de Heisenberg, les concepts classiques d'onde et de corpuscule ne sont pas considérés comme pertinents et ne font donc pas partie du formalisme. Or, comme le remarque Bohr, la dérivation des inégalités par l'expérience de pensée du microscope (ou toute autre expérience impliquant les relations de Heisenberg) requiert d'introduire soit la relation de de Broglie $p = \frac{h}{\lambda}$, soit celle de Planck-Einstein $E = h\nu$, qui manifestent de cette dualité.

Bohr précise ce point lors de la conférence de Côme en proposant une seconde dérivation des relations de Heisenberg à partir de l'analyse de Fourier.[46] Dans celle-ci, l'étalement du spectre en fréquence d'un signal est relié à la durée du signal par la relation :

$$\Delta t \cdot \Delta \nu \geq \frac{1}{2} \tag{1.24}$$

45. Cette dernière relation entre le temps et l'énergie ne possède pas d'interprétation physique immédiate puisqu'à la différence des autres observables, elle n'est pas un opérateur mathématique.

46. Scott Tanona, « Uncertainty in Bohr's response to the Heisenberg microscope », *Stud. Hist. Philos. Sci. B* 35, n° 3 (2004) : 489–491.

Ainsi, plus un signal est de courte durée, plus son étalement fréquentiel est élevé. La même relation peut être obtenue entre la position et la longueur d'onde :

$$\Delta x \cdot \Delta \left(\frac{1}{\lambda_x} \right) \geq \frac{1}{2} \tag{1.25}$$

Les relations d'indétermination de Heisenberg se déduisent aisément en introduisant la relation de Planck-Einstein $E = h\nu$ et de de Broglie, $p = \frac{h}{\lambda}$ dans l'équation (1.25). La dépendance entre l'indétermination sur les valeurs des observables conjuguées et la dualité onde-corpuscule apparait explicitement dans cette seconde dérivation des inégalités. Selon Bohr, les relations de Heisenberg expriment une limite dans la précision de la définition même des concepts position et quantité de mouvement au niveau quantique. Les incertitudes sur la mesurabilité simultanée n'en sont qu'une conséquence. Les relations de Heisenberg ne possèdent donc pas uniquement une valeur épistémologique, mais également ontologique.

Dans l'expérience du microscope de Heisenberg, la dérivation des relations d'indétermination par l'analyse de Fourier implique de traiter à la fois le photon et l'électron comme des paquets d'onde. Bohr insiste davantage que Heisenberg sur l'interaction entre le photon et l'électron qui affecte les deux parties. Après l'interaction, l'électron ne peut pas posséder une quantité de mouvement plus précise que celle du rayonnement utilisé pour l'éclairer. Ainsi, Bohr marque sa préférence pour le formalisme ondulatoire de Schrödinger plutôt que celui matriciel et corpusculaire de Heisenberg. Cependant, il est explicite sur la question de l'ontologie des « ondes de matière » : il refuse de leur accorder une quelconque réalité, au contraire de Schrödinger, principalement en raison de leur définition dans l'espace des phases. Ces ondes relèvent du domaine de la représentation abstraite et sont employées afin de fournir une correspondance entre les concepts quantique et classique.[47]

Malgré le problème de la définition simultanée de certains concepts classiques à l'échelle quantique, Bohr postule qu'ils sont pourtant indispensables au physicien afin qu'il puisse communiquer ses résultats sans ambiguïté. D'une part, les instruments qu'il utilise fournissent des valeurs classiques, typiquement la position d'une aiguille sur un cadran. D'autre part, tout discours cohérent doit respecter le principe de causalité et se dérouler dans un cadre spatiotemporel bien défini. Mais, comme ces modes de descriptions ne sont pas, dans le domaine des quanta, mobilisables simultanément, Bohr les qualifie de complémentaires. La description spatiotemporelle est complémentaire de la description causale, où la causalité chez Bohr est équivalente à la conservation de l'énergie et de l'impulsion.

L'indéterminisme et la complémentarité sont donc les deux pierres angulaires de la nouvelle mécanique quantique selon l'interprétation de Bohr. L'approche est ainsi

47. Tanona, « Uncertainty in Bohr's response to the Heisenberg microscope », 503.

nettement plus révolutionnaire puisqu'en franche rupture avec les principes constitutifs de la mécanique classique. L'interprétation bohrienne s'impose rapidement dès la fin des années 1920. Bien que s'éloignant de l'appréhension intuitive de la réalité, Bohr est le seul en mesure de proposer une interprétation cohérente de la mécanique quantique, les opposants comme Einstein et Schrödinger ne faisant que soulever certains paradoxes apparents de l'interprétation sans pour autant être en mesure de proposer une alternative. Surtout, ces critiques, comme le paradoxe EPR sur la complétude ou le chat de Schrödinger sur la mesure, ne franchissent pas le seuil des laboratoires puisqu'elles ne comportent aucune conséquence expérimentale. Pour cette raison, la majorité des physiciens les considère sans intérêt pour le développement de la théorie et les laisse à l'appréciation des philosophes des sciences.[48]

Pour en revenir à de Broglie, avec la complémentarité qui suscite l'adhésion rapide des principaux physiciens quantiques, la théorie de la double solution qui repose au contraire sur une description spatiotemporelle et causale ne pouvait qu'immanquablement recevoir un accueil négatif. Il en effectue la triste expérience en septembre 1927 au cours du ve Conseil Solvay.

1.1.6 La réception négative de la théorie de l'onde pilote au ve Conseil Solvay et les raisons d'un abandon

Grâce à sa contribution fondamentale à l'élaboration de la mécanique quantique, de Broglie acquiert une notoriété internationale. Alors qu'il est un *outsider*, relativement isolé du reste de la communauté, il y est propulsé en quelques années au premier plan. Il gagne en particulier son invitation à participer au très prestigieux v^e^ Conseil Solvay de 1927 à Bruxelles. Le ve Conseil Solvay est donc l'occasion pour de Broglie de présenter pour la première fois devant les plus importants membres de la communauté des physiciens quantique la théorie de l'onde pilote, version simplifiée de la double solution. Le Conseil est présidé par Hendrik Lorentz et il se tient à l'Institut de physiologie du parc Léopold à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927. Le thème retenu par les organisateurs est « électrons et photons» et met à l'honneur les nombreuses contributions récentes aux théories atomique et du rayonnement.

Ce Conseil Solvay est l'un des évènements les plus marquants de l'histoire de la physique quantique. Il rassemble les meilleurs physiciens de l'époque ; sur les vingt-neuf participants, dix-neuf possèdent ou possèderont un prix Nobel de physique ou de chimie. Il est surtout le lieu de vifs échanges quant à l'interprétation de la nouvelle mécanique qui vont se poursuivre tout au long des années 1930, notamment entre

48. Freire Jr., « A Story Without an Ending : The Quantum Physics Controversy 1950–1970», 575–576.

Bohr et Einstein. Toutes les grandes questions qui vont structurer les débats quantiques au cours du XXe siècle sont discutées cette semaine-là : le déterminisme et la causalité, le problème de la mesure et de l'effondrement du paquet d'onde, ainsi que celui de la localité et de la complétude de la théorie. La nature des débats, dans lesquels les questions interprétatives sont intrinsèquement connectées aux problématiques purement physiques est symptomatique de cette période où la mécanique quantique est une théorie en cours de stabilisation. L'onde pilote est l'une des trois grandes théories quantiques en compétition exposée aux côtés de l'interprétation probabiliste de Born et Heisenberg et de la mécanique ondulatoire de Schrödinger. En outre, deux autres conférences de William Lawrence Bragg sur la diffraction des rayons X et de Compton sur la mise en évidence expérimentale de l'existence des photons sont à l'ordre du jour du Conseil. Comme à l'accoutumée pendant les conférences, les discussions se poursuivent bien après les séances, pendant les pauses café, à l'hôtel et pendant les repas. Heisenberg aime à préciser dans son témoignage que c'est à l'occasion des repas que les discussions les plus intéressantes se sont tenues, notamment la célèbre polémique entre Bohr et Einstein sur le déterminisme, et la célèbre phrase d'Einstein quant au fait que « Dieu ne joue pas aux dés.»[49] De Broglie n'assiste pas au Conseil en simple invité, il est désigné rapporteur par Lorentz, ce qui lui permet d'avoir une session entière dédiée à l'onde pilote, dans un exposé intitulé « La nouvelle dynamique des quanta ».[50] Cet épisode constitue l'unique occasion où la théorie est débattue par la communauté des physiciens quantiques, de Broglie l'abandonnant quelque temps après l'issue du Conseil.

L'exposé de de Broglie est, dans les grandes lignes, une reprise de l'article publié au *Journal de Physique et le Radium* de 1927 (voir la section 1.1.4 page 26). Il applique sa théorie aux systèmes à plusieurs corps dans un cadre non relativiste et présente également quelques applications pour expliquer les phénomènes d'interférences, de diffraction et de transitions entre les états d'énergies atomiques. La théorie de l'onde pilote est vivement débattue à la suite de la présentation et durant la discussion générale. De Broglie prend conscience qu'il est en terrain hostile et que, mis à part Brillouin, il ne peut compter sur aucun soutien, y compris parmi les adversaires déclarés de l'indéterminisme, Einstein et Lorentz. Les critiques majeures concernent la mesure. L'histoire a surtout retenu celle de Pauli à propos des collisions inélastiques. Elle est souvent présentée, à tort, comme étant l'unique responsable de l'abandon de la théorie par de Broglie. La deuxième objection, de Kramers, est relative à la mesure du recul d'un miroir engendré par la réflexion d'un photon.[51]

49. Werner Heisenberg, *La partie et le tout : Le monde de la physique atomique* (Paris : Flammarion, 2010), 144–145.
50. Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960) », 63.
51. Bacciagaluppi et Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads*, 209-223.

L'objection de Pauli

Pour illustrer la difficulté de la théorie de l'onde pilote dans le cas d'une collision inélastique, c'est-à-dire lorsque l'énergie cinétique totale n'est pas conservée, car transformée tout ou partie en énergie interne, Pauli prend l'exemple d'un système stationnaire (évolution indépendante du temps), siège d'une collision entre un électron, qui se déplace dans le plan (x, y), et un rotateur plan périodique à un degré de liberté (son angle de rotation φ). Pauli montre que la vitesse angulaire du rotateur dans son état final, à partir de la formule de guidage de l'onde pilote, n'est pas constante, contrairement au résultat attendu. Il est important de noter que Pauli ne résout pas le système directement, mais comme c'est souvent le cas en physique, il utilise un système de substitution qui simplifie grandement le traitement mathématique. Dans le cas présent, il emprunte une analogie de Fermi de 1926 qui assimile cette collision à la diffraction dans un milieu homogène d'une onde plane à trois dimensions (x, y, φ) par un réseau périodique infini le long de la coordonnée φ et dont les trous sont espacés de 2π et qui s'étend de $-\infty$ à $+\infty$. Cette analogie impose une contrainte de taille sur l'onde incidente, celle-ci doit nécessairement être d'extension infinie le long de φ. En conséquence, les ondes diffractées en tout point de l'espace de configuration se chevauchent et l'état final du système est une superposition de tous les états d'énergie possibles (valeurs propres). L'énergie du rotateur, et par extension sa vitesse angulaire, ne sont ainsi pas bien définies.

De Broglie fournit les principaux éléments de réponse pour lever l'objection bien qu'il soit incapable de proposer une solution complète. Il indique que la solution serait de considérer l'électron incident comme une onde d'extension latérale limitée dans l'espace (ce que l'analogie avec l'optique semble cependant interdire). Ainsi, les ondes diffractées ne se chevaucheraient plus dans l'espace. C'est d'ailleurs une onde finie qui est utilisée par Brillouin lorsqu'il considère les collisions élastiques dans la théorie de l'onde pilote. De Broglie considère également que l'espace de configuration utilisé par Pauli est artificiel, puisque formé par le déploiement à l'infini du cercle unitaire du rotateur le long de l'axe réel φ.

L'objection de Kramers

La seconde objection majeure contre l'onde pilote est formulée par Kramers. Contrairement aux collisions inélastiques, de Broglie n'est pas en capacité de fournir un début d'explication. Kramers demande comment rendre compte de la pression exercée par un photon unique sur un miroir. De Broglie, désemparé, répond sans convaincre qu'en l'état actuel sa théorie ne traite que des ensembles de particules. Elle pourrait calculer une telle pression uniquement pour un nuage de points, mais pas pour un photon individuel. Venant en aide à de Broglie, Brillouin rétorque qu'en l'état

actuel aucune formulation de la théorie quantique, qu'elle soit sous la forme matricielle, ondulatoire ou de l'onde pilote, ne permet de répondre à l'interrogation de Kramers. En effet, la manière de traiter correctement ce problème est de considérer le miroir non classiquement, mais comme partie du système quantique, c'est-à-dire d'intégrer ses coordonnées dans la fonction d'onde. Or, ce n'était pas du tout une procédure standard des physiciens en 1927.

L'abandon de la double solution et l'adhésion à la complémentarité

Au sortir de Solvay, de Broglie subit une véritable traversée du désert. Il est théoriquement isolé par la réception majoritairement négative de l'onde pilote et dépourvu du soutien des autres partisans du réalisme physique. Pis, rétrospectivement, il découvre de nouvelles faiblesses conceptuelles dans son modèle, dont la principale est qu'en déduisant la relation de guidage à partir de l'onde ψ qui est une onde de probabilité, donc fictive dans le sens de non matérielle, il « aboutit à ce résultat inacceptable de faire déterminer le mouvement du corpuscule par une grandeur [...] qui dépend de l'état de connaissance de celui qui l'emploie et qui doit varier brusquement lorsqu'une information vient modifier ces connaissances.»[52] Résigné, il capitule devant l'interprétation de Bohr et adopte la complémentarité. D'après les lignes précédentes, il serait facile de déduire que cette adhésion est seulement par défaut. Cependant, le fait qu'il s'emploie à diffuser activement la complémentarité en France dans les années 1930 ainsi que le théorème *no-go* de John von Neumann[53] sur l'impossibilité de compléter la mécanique quantique par des variables cachées montre une véritable d'adhésion.[54] Il n'hésite pas à renier publiquement son ancien programme de recherche, comme il l'écrit en 1945 :

> Il semble bien qu'il soit impossible de ramener [...], par l'introduction de variables cachées, l'indéterminisme quantique à un déterminisme sous-jacent. C'est encore ce qu'a montré M. von Neumann dans ses profonds travaux sur la question. Il a, en effet, prouvé que les lois de probabilité énoncées par la nouvelle Mécanique ondulatoire et quantique pour les phénomènes élémentaires, lois bien vérifiées par l'expérience, n'ont pas la forme qu'elles devraient avoir pour qu'on puisse les interpréter comme dues à notre ignorance des valeurs exactes de certaines variables cachées. La voie qui paraissait rester ouverte dans cette direction pour restaurer le déterminisme à l'échelle atomique semble donc se fermer devant nous. On

52. Dans ce texte écrit plus de 25 ans après les faits, de Broglie revient sur les raisons de son abandon. Louis de Broglie, *Nouvelles perspectives en microphysique* (Paris : Gauthier-Villars, 1956), 130.

53. John von Neumann, «Développement axiomatique de la théorie», in *Les fondements mathématiques de la mécanique quantique*, trad. Alexandre Proca (Berlin : Springer Verlag, 1932 ; Sceaux : Jacques Gabay, 1988).

54. Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960)», 211.

conçoit l'importance scientifique et philosophique de la démonstration de M. von Neumann.[55]

Cette période bohrienne de de Broglie coïncide avec son ascension institutionnelle. Il obtient un poste de maitre de conférences en 1928 à la création de l'IHP. Il obtient le prix Nobel de physique en 1929 tout juste âgé de 36 ans. La récompense suprême lui permet en 1933 de succéder à Léon Brillouin, nommé au Collège de France, sur la chaire de théorie physique de la Faculté des sciences de Paris, rattachée à l'IHP.[56] En point d'orgue, il est élu secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences en 1942. En 1932, l'activité de recherche de de Broglie reprend de l'élan. Son principal programme de recherche est « la théorie des particules à spin » concurrente de la théorie quantique des champs.[57] La période « bohrienne » de de Broglie, en rupture avec le programme de la double solution et l'onde pilote ne modifie pas pour autant son style de recherche. Celui-ci demeure centré sur l'élaboration de modèles physiques généraux et dont le lien avec l'expérience n'est pas la préoccupation première. À l'IHP, il s'entoure d'élèves, parmi lesquels figurent Jean Louis Destouches, Olivier Costa de Beauregard, Marie-Antoinette Tonnelat et Gérard Petiau qu'il forme à cette école.[58] Ces physiciens vont entretenir cette tradition de recherche qui diffère d'une physique beaucoup plus tournée vers la résolution de problèmes, en vogue après la guerre, concomitante avec l'émergence du phénomène de la « big science ». Cette parenthèse bohrienne de de Broglie dure pendant près de 25 ans, jusqu'à ce qu'il se décide à revenir à sa théorie, sous l'impulsion de David Bohm qui redécouvre l'onde pilote en la perfectionnant, mais surtout de son entourage au sein de l'IHP. Ce second revirement de de Broglie sera discuté dans le chapitre suivant.

1.2 Les variables cachées de David Bohm et le renouveau du débat quantique après la Seconde Guerre mondiale

En 1951, le physicien américain David Bohm ressuscite le modèle déterministe de de Broglie en proposant une nouvelle formulation de la mécanique quantique à l'aide de variables cachées analogue à celle de l'onde pilote, mais découverte totalement indépendamment de celle-ci, et dans un contexte bien différent. Depuis, l'interprétation orthodoxe est devenue hégémonique au sein de la communauté des physiciens

55. Louis de Broglie, « Hasard et contingence en physique quantique », *Revue de métaphysique et de morale* LV (1945) : 241-252.
56. Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960) », 64–65.
57. Ibid., 82.
58. Ibid., 160-161.

quantiques. Cette hégémonie ne signifie pas pour autant la fin du débat quantique. Par contre, les questions interprétatives ne sont pas considérées comme faisant partie du domaine de la physique, car perçues comme d'essence métaphysique dans le sens qu'elles sont des discussions philosophiques sans implications expérimentales. C'est par exemple le cas des célèbres expériences de pensée du chat de Schrödinger et du paradoxe EPR de 1935. D'autant que toute possibilité d'une alternative au formalisme standard semble définitivement écartée, après que von Neumann ait « prouvé» l'impossibilité de compléter la mécanique quantique à l'aide de paramètres supplémentaires qui n'entrent pas en contradiction avec les principes de la théorie.[59] En fournissant un contre-exemple au théorème de von Neumann, pour paraphraser John Bell, Bohm « réalise l'impossible.»[60] Chronologiquement, il n'est cependant pas le premier à démontrer la limite de validité du théorème. Dès 1935, la mathématicienne et philosophe allemande Grete Hermann souligne la circularité du raisonnement de von Neumann en utilisant une preuve qui sera indépendamment redécouverte par Bell de 1964. Cependant, la démonstration de Hermann est restée confidentielle jusqu'à ce que l'historien Max Jammer établisse la priorité de Hermann sur Bell en 1974.[61] Pour cette raison, la contribution de Bohm est celle qui donne une nouvelle impulsion au débat sur les fondements de la mécanique quantique. À noter que le Français Jacques Solomon propose également une preuve de l'inconsistance des théories à variables cachées en 1933, mais sa démonstration est entachée d'une erreur de calcul (voir la section 8.1.2 page 246).

1.2.1 David Bohm, un physicien dans la tourmente

Bohm est, avec entre autres Richard Feynman, Julian Schwinger, Norman Kroll et Willis Lamb, de cette nouvelle génération de physiciens nord-américains dont la carrière est fortement marquée par la Seconde Guerre mondiale et la Guerre froide. Aux États-Unis, l'effort de guerre nécessite la création de grandes équipes, pluridisciplinaires, constituées autant de physiciens théoriciens que d'ingénieurs et dans lesquelles la frontière entre science fondamentale et appliquée tend à s'effacer. Les exemples les plus emblématiques sont le projet Manhattan à Los Alamos sous la direction de J. Ro-

59. Freire Jr., « A Story Without an Ending : The Quantum Physics Controversy 1950–1970», 575-576.

60. John S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Collected Papers on Quantum Philosophy (Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1987), 160.

61. Léna Soler, «The Convergence of Transcendental Philosophy and Quantum Physics : Grete Henry-Hermann's 1935 Pioneering Proposal : Transcendental Perspectives on Modern Physics», in *Constituting Objectivity*, sous la dir. de Michel Bitbol, Pierre Kerszberg et Jean Petitot (Springer, 2009), 336-337 ; Pour une traduction en langue anglaise des principaux textes de Grete Hermann, accompagnée de travaux récents en histoire et philosophie des sciences sur ces contributions, voir : Elise Crull et Guido Bacciagaluppi, éds., *Grete Hermann : Between Physics and Philosophy* (Dordrecht : Springer Netherland, 2016).

bert Oppenheimer, le Metallurgical Laboratory de Chicago d'Arthur H. Compton ou le « Rad Lab» du Massachusetts Institute of Technology (MIT) dirigé par Vannevar Bush, notamment à l'origine du Radar H2X qui équipe le bombardier B-29 utilisé lors des largages des deux bombes à Hiroshima et Nagasaki les 6 et 9 aout 1945.[62] C'est la naissance de la « Big science». Si ce phénomène ne se restreint pas à la physique, le contexte de la Guerre froide et l'importance stratégique de la recherche sur l'atome pour les états font de la physique la discipline académique reine. Le budget qui lui est alloué aux États-Unis est supérieur à celui de toutes les autres disciplines réunies. Dans les universités, le nombre d'étudiants en physique explose. Cette massification des classes nécessite d'adapter les enseignements qui se concentrent essentiellement sur la technique et la résolution de problèmes concrets et délaissent les questions interprétatives.[63] Cette nouvelle génération est imprégnée d'une approche pragmatique envers la théorie, résumée par la célèbre citation apocryphe de Feynman : « Shut up and calculate !»[64]

Le cursus de Bohm s'inscrit totalement dans ce cadre particulier de la physique nord-américaine. Après un cursus en physique à Caltech, il rejoint, à Berkeley, le Radiation Lab de l'Université de Californie dirigé par Oppenheimer. Il y poursuit une thèse de doctorat sur les calculs de diffusion des collisions de protons et de noyaux de deutérium. Après l'entrée en guerre des États-Unis en 1941 et le lancement du projet Manhattan, sa thèse est logiquement classée secret défense et il se voit interdit de soutenir ainsi que de communiquer publiquement ses résultats. Ce n'est que par l'intervention d'Oppenheimer, qui témoigne de la qualité de la recherche et qui le considère comme l'un de ses étudiants les plus brillants, que l'Université de Berkeley lui décerne le titre de docteur. Oppenheimer souhaite, à l'instar de nombreux membres du Rad Lab, qu'il intègre le nouveau site de Los Alamos. Le général Leslie Groves, à la tête du projet Manhattan, refuse en raison des suspicions qu'il porte sur l'orientation communiste de Bohm. À cette époque, Bohm fréquente, avec son collègue Joseph Weinberg, diverses organisations affiliées ou proches du Parti communiste des États-Unis d'Amérique (CPUSA), telle la Fédération des Architectes, Ingénieurs, Chimistes et Techniciens (FAECT), syndicat affilié à la Congrès des organisations industrielles

62. Lillian Hoddeson, Paul V. Henriksen et Catherine L. Westfall, *Critical Assembly : A Technical History of Los Alamos during the Oppenheimer Years, 1943–1945* (Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2004), 401-405.

63. David Kaiser, « The Postwar Suburbanization of American Physics », *American Quarterly* 56, n° 4 (2004) : 878-879.

64. Sur la caractérisation du tournant épistémologique de la physique américaine d'après guerre, voir Eduard Prugovečki, « Realism, positivism, instrumentalism, and quantum geometry », *Found. Phys.* 22, n° 2 (1995) : 143-186 ; Pour une approche plus historique, voir le chapitre 1 « Shut up and Calculate » de : David Kaiser, *How the Hippies Saved Physics : Science, counterculture, and the Quantum revival* (New York City, NY : Norton, 2011), 1-23.

(CIO) et soupçonné d'être infiltré par les Soviétiques.[65] Cet épisode n'est que le premier de ses démêlés avec l'administration à cause de son orientation politique, qui va singulièrement faire diverger son parcours pourtant promis à une carrière brillante.

En 1947, Bohm est embauché à Princeton en tant que professeur-assistant en physique théorique. Il produit quelques contributions majeures, notamment en physique des plasmas, domaine dans lequel il découvre en 1949 la loi de diffusion à travers un champ magnétique en $1/B$ contredisant la diffusion classique en $1/B^2$. Signe qu'il est considéré comme l'un des physiciens les plus prometteurs de sa génération, il est invité à participer à la conférence de Shelter Island la même année, première conférence de physique théorique d'un cycle en comportant trois, avec Pocono (1948) et Oldstones (1949). Ces conférences ont pour objectif de capitaliser sur cette jeune génération formée pendant la guerre et donner une nouvelle impulsion à la physique théorique nord-américaine. D'un esprit élitiste, pour leurs organisateurs, elles se veulent les héritières des conférences Solvay, notamment celle de 1911.[66]

Fig. 1.3: David Bohm à la conférence Shelter Island en 1947. Debout, de gauche à droite : Willis Lamb, Karl K. Darrow, Victor Weisskopf, George E. Uhlenbeck, Robert E. Marshak, Julian Schwinger et David Bohm. Assis, de gauche à droite : J. Robert Oppenheimer, Abraham Pais, Richard P. Feynman et Herman Feshbach.

65. Russel Olwell, «Physical Isolation and Marginalization in Physics. David Bohm's Cold War Exile», *Isis*, n° 90 (1999) : 741.

66. Pour un résumé de ces trois conférences, et de leur impact dans le renouveau de la physique, voir Schweber, *QED and the men who made it*, 156–205.

Cependant, la carrière de Bohm est au tournant. En ce début de Guerre froide, l'atmosphère entretenue par l'administration américaine est à la suspicion généralisée face à la menace communiste. La House Un-American Activities Committee (HUAC), créée en 1938 et qui devient une commission permanente en 1945, mène une investigation de vaste envergure sur un supposé réseau d'espionnage soviétique au sein du Rad Lab. Oppenheimer et nombre de ses anciens élèves et collaborateurs, dont Edward Condon, Joseph Weinberg, Giovanni Rossi Lomanitz, Max Friedman, I. David Fox, Bruce Dayton, Philip Morrison, Bernard Peters, Wendell Furry, et David Bohm, tombent sous le coup d'une enquête et sont appelés à témoigner devant la HUAC.[67] Bohm est convoqué en mai et juin 1949. Initialement, il part avec l'idée de ne pas cacher son adhésion au communisme, puisque ceci n'a rien d'illégal. Néanmoins, il se ravise suivant les sages conseils d'Einstein : en ces temps difficiles, il faut savoir en certaines circonstances garder sa fierté et faire profil bas. Bohm trouve une solution moralement acceptable en refusant de répondre lorsque le comité lui demande s'il est ou a été membre du parti communiste, plaidant le Cinquième amendement de la Constitution américaine qui empêche une personne à devoir témoigner contre elle-même. Il refuse également de répondre aux questions concernant les autres physiciens, ce qui est considéré comme un outrage.[68]

Pendant toute la durée de l'enquête, l'administration de Princeton lui interdit d'enseigner, de continuer ses recherches au département de physique et même de fréquenter la bibliothèque de l'université. Le témoignage d'Oppenheimer devant ce même comité en juin 1949 aggrave encore la situation. Oppenheimer, intimidé, répond positivement lorsqu'on lui demande si parmi quatre de ses anciens étudiants, Weinberg, Lomanitz, Peters et Bohm, certains n'auraient pas des liens avec le parti communiste. Les conséquences pour ces quatre jeunes physiciens sont tragiques, alors même que les déclarations d'Oppenheimer sont, sur plusieurs points, purement et simplement inventées.[69] Weinberg, renvoyé de l'université du Minnesota, trouve un travail dans une entreprise d'optique privée et ne peut reprendre sa carrière académique qu'en 1959 à l'université Case Western Reserve. Idem pour Lomanitz qui perd son poste à l'université de Fisk et travaille dans l'entretien des chemins de fer pour un salaire de misère jusqu'en 1959.[70] Peters, ancien rescapé de Dachau qui s'est installé aux États-Unis après avoir fui le nazisme, sauve de justesse son poste à l'université de Rochester, mais il se voit interdit d'accès aux publications classifiées l'empêchant *de facto* de poursuivre

67. David Kaiser, « The Atomic Secret in Red Hands ? American Suspicions of Theoretical Physicists During the Early Cold War », *Representations* 90 (2005) : 29.

68. Kai Bird et Martin J. Sherwin, *American Prometheus : The Triumph And Tragedy Of J. Robert Oppenheimer* (New York City, NY : Vintage Books, 2005), 394.

69. Par exemple, contrairement à ce qu'a déclaré Oppenheimer, Peters n'a jamais adhéré au Parti communiste allemand. Shawn Khristian Mullet, « Little Man : Four Junior Physicists and the Red Scare Experience » (thèse de doct., Harvard University, 2008), 19.

70. Bird et Sherwin, *American Prometheus*, 399.

ses recherches en physique nucléaire. Il décide alors de retourner en Europe et adopte la nationalité allemande en 1955 pour terminer sa carrière à l'Institut Niels Bohr à Copenhague.[71] Quant à Bohm, bien que relaxé en 1951, Princeton persiste et décide de ne pas lui renouveler son contrat, malgré le témoignage de plusieurs étudiants et collègues en sa faveur. Einstein aimerait l'embaucher comme assistant au sein du prestigieux Institute for Advanced Study (IAS) situé à deux pas du campus principal de Princeton, mais Oppenheimer y met son véto. En cette période de tensions extrêmes, celui-ci choisit coûte que coûte de sauver sa carrière dont l'avenir s'assombrit de jour en jour. Il se doit de montrer patte blanche auprès des autorités et, dans cette perspective, maintenir Bohm dans son entourage représente un danger bien trop grand.

La situation de Bohm est de plus en plus précaire et il prend alors conscience que sa réputation le prive de tout espoir de trouver un quelconque travail dans une université américaine. Jayme Tiomno, physicien brésilien et étudiant de Princeton de 1948 à 1950, lui propose de le rejoindre à l'Université de São Paulo (USP). Il se résigne à accepter l'idée de s'exiler et obtient le poste pour lequel Oppenheimer lui écrit sa lettre de recommandation.[72]

1.2.2 La théorie des variables cachées

Entre 1949 et 1951, Bohm, isolé, ne cesse pas pour autant toute activité de recherche. Libéré de toute contrainte d'enseignement, il met à profit son temps pour s'interroger sur les fondements de la mécanique quantique, à contre-courant de la tendance dominante des physiciens américains qui considère le sujet clos par les pères fondateurs depuis la fin des années 1920.

Élève d'Oppenheimer, Bohm a reçu un enseignement bohrien de la mécanique quantique des plus orthodoxes, interprétation à laquelle il adhère par défaut. Au début de 1951, il termine d'ailleurs un livre de cours, *Quantum Theory*[73] qui défend cette interprétation. Il en envoie un exemplaire à Einstein qui apprécie l'ouvrage alors qu'il est pourtant l'un des plus fervents opposants à la complémentarité. Il invite Bohm à venir en discuter à l'IAS. Einstein aime particulièrement la partie sur le paradoxe EPR qu'il considère comme la plus convaincante défense du point de vue de Bohr, même s'il campe sur ses positions.

Leur discussion impacte profondément Bohm. Einstein le convainc que ses objections contre la complémentarité demeurent toujours sans réponse, contrairement à ce qu'affirment les bohriens. Les critiques d'Einstein sèment le doute dans l'esprit de Bohm qui commence alors à remettre en question son point de vue. Alors qu'il conce-

71. Silvan S. Schweber, *In the Shadow of the Bomb : Oppenheimer, Bethe, and the Moral Responsibility of the Scientist* (Princeton, NJ : Princeton University Press, 2007), 115–148.
72. Bird et Sherwin, *American Prometheus*, 400.
73. David Bohm, *Quantum Theory* (New York, NY : Prentice-Hall, 1951).

vait la complémentarité comme l'expression de la dialectique matérialiste, le processus de la mesure, par l'étrange réduction du paquet d'onde, ne lui semble plus aussi cohérent et acceptable qu'auparavant. Bohm mentionne également l'approximation Brillouin-Kramers-Wentzel (BKW) qui permet de simplifier les calculs en mécanique quantique par un traitement semi-classique en dotant les particules de trajectoires. Il se demande alors dans quelle mesure ces trajectoires ne pourraient pas être considérées comme réelles, alors qu'elles ne sont originellement qu'une astuce calculatoire à visée simplificatrice. En effet, la notion de trajectoire est absente de la mécanique quantique en raison des inégalités de Heisenberg.[74] Dans un entretien à Jammer en 1967, Bohm ajoute parmi ses influences la littérature soviétique sur le sujet, probablement des articles de Blokhintzev[75] et Terletski,[76] les plus ardents opposants à ISMQ en Union des républiques socialistes soviétiques (URSS).[77] Cependant, sa mémoire semble lui faire défaut puisque Jammer remarque plus tard qu'à cette époque aucune traduction anglaise d'articles soviétiques ne circulait aux États-Unis.[78] Nos sources confirment l'hypothèse de Jammer puisqu'en septembre 1952, il demande à Évry Schatzman de lui communiquer des articles soviétiques sur la mécanique quantique, en anglais ou en français.[79]

En quelques mois, Bohm met sur pied une interprétation déterministe de la mécanique quantique qui attribue aux particules des trajectoires réelles par l'intermédiaire de variables cachées, contredisant ainsi le théorème de von Neumann. Cette période est un tournant dans sa carrière et va marquer l'histoire de la mécanique quantique. Ironiquement, il en est redevable à la HUAC.[80]

Toutefois, l'opposition entre les vues exprimées dans son livre et dans sa nouvelle théorie est relative. Les deux ont en effet une vocation commune de clarifier la mécanique quantique en faisant reposer ses concepts fondamentaux sur une base réaliste, compatible avec le matérialisme philosophique du physicien. Pour cette raison, *Quantum Theory* ne peut pas vraiment être qualifié d'ouvrage purement orthodoxe.[81] De plus, cette continuité entre le livre et les variables cachées est également visible dans leur traitement commun de l'acte de mesure. En effet, tous les deux intègrent l'appareil de mesure dans l'hamiltonien total, à la manière de von Neumann. Là aussi, c'est une différence notable avec la complémentarité bohrienne, qui rapproche Bohm du

74. F. David Peat, *Infinite Potential : The Life and Times of David Bohm* (New York City, NY : Basic Books, 1997), 110-112.
75. Également orthographié « Blokhinzev » ou « Blokhinzhev ».
76. Également orthographié « Terletsky » ou « Terletzky ».
77. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, 279.
78. Olival Freire Jr., *The Quantum Dissidents : Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950–1990)* (Berlin : Springer, 2015), 27.
79. David Bohm, David Bohm à Évry Schatzman, 7 septembre 1952, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.
80. Ibid.
81. Freire Jr., *The Quantum Dissidents*, 26-27.

courant interprétatif plus tard désigné « école de Princeton », dont les principales figures sont John von Neumann, Georg Süßmann, Josef Maria Jauch et Eugene P. Wigner. Cette différence de traitement de la mesure n'est pas anodine. Elle sera à l'origine d'une controverse au sein même de l'orthodoxie qui engendrera un schisme dans les années 1960.[82]

Bohm termine son article au début de l'été 1951. Il en envoie une copie à plusieurs physiciens, entre autres Einstein et Pauli. C'est ainsi que Bohm découvre, à sa surprise, qu'il n'est pas le premier à avoir eu l'idée de maintenir le concept de trajectoire en mécanique quantique. Einstein et Pauli n'ont pas manqué de lui signaler la tentative similaire de de Broglie, tous deux étant présents au ve Conseil Solvay de 1927. D'ailleurs, Pauli critique la théorie de Bohm comme celle de de Broglie à l'époque (voir la section 1.1.6 page 39), ce qui motive Bohm à compléter son article pour répondre spécifiquement à cette objection. L'article se divise en deux parties. La première est une présentation générale de la dynamique des particules dans le cadre de la théorie des variables cachées alors que la seconde est consacrée spécifiquement au processus de mesure dans la nouvelle interprétation.

La dynamique des particules

David Bohm annonce dès l'introduction du premier article qu'il inscrit sa démarche en opposition à la complémentarité de Bohr. Bien qu'il concède à la complémentarité une cohérence interne, il estime qu'elle est toutefois fondée sur deux hypothèses invérifiables :

1. La fonction d'onde Ψ accompagnée de son interprétation probabiliste fournit la description la plus complète possible de l'état d'un système individuel.

2. Le processus de transfert d'un quantum du système observé à l'appareil de mesure est imprévisible, incontrôlable et inanalysable.

À partir de ces deux postulats il est possible de déduire la relation d'indétermination de Heisenberg selon laquelle le produit des écarts types de deux observables qui ne commutent pas est supérieur à $\hbar/2$. Dans un style poppérien, Bohm argumente que ces deux hypothèses ne contraignent pas suffisamment le formalisme mathématique de l'ISMQ pour imaginer une expérience qui permettrait de les tester et éventuellement de les réfuter. Concrètement, il est toujours possible d'adapter l'appareil mathématique de la théorie pour qu'elle reste en accord avec l'expérience sans remettre en cause les deux postulats de base. Bohm en conclut :

82. Osvaldo Pessoa, Olival Freire Jr. et Alexis De Greiff, « The Tausk Controversy on the Foundations of Quantum Mechanics : Physics, Philosophy, and Politics », *Physics in Perspective* 10, n° 2 (2008) : 140-142.

> Tant que l'on accepte l'interprétation standard de la mécanique quantique, on ne peut concevoir aucune expérience qui mène à l'abandon de cette interprétation, même si elle se révélait fausse. Pour cette raison, l'interprétation standard présente un danger considérable de tomber dans un piège consistant en une chaine fermée sur elle-même d'hypothèses circulaires dont il est par principe invérifiable si elles sont vraies.[83]

Bohm imagine alors une proposition qui contredit les deux postulats :

> Le résultat d'une mesure sur un système est le produit d'une interaction d'éléments qui sont à ce jour « cachés».

L'introduction « d'éléments cachés» implique en effet, d'une part, que la fonction d'onde ne fournit pas une description complète du système et, d'autre part, que le transfert d'un quantum n'est pas, par principe, imprévisible, incontrôlable et inanalysable. Pour être cohérent, Bohm sait qu'il devrait accompagner cette proposition d'une expérience qui puisse mettre en lumière l'existence de telles variables cachées et ainsi différencier les deux interprétations. S'il ne précise pas de protocole expérimental, l'idée est que pour des échelles nucléaires, de l'ordre de 10^{-13} cm, les statistiques quantiques données par le carré de la fonction d'onde Ψ cesseraient d'être valables.

À l'instar de l'onde pilote de Louis de Broglie, les variables cachées de Bohm proposent une description déterministe des particules quantiques. Les formalismes mathématiques des deux théories possèdent un grand nombre de points communs, du fait notamment de leurs méthodes communes pour aboutir aux équations du mouvement des particules par séparation des parties réelles et imaginaires dans les équations. Elles ne sont cependant pas strictement identiques tant sur les plans mathématique que conceptuel. Bohm dérive sa théorie de l'équation non relativiste de Schrödinger alors que de Broglie, dès 1924, se place dans un cadre relativiste. Du point de vue conceptuel, le champ Ψ est considéré comme un champ réel par Bohm, alors que de Broglie le considère comme un champ fictif, à l'origine de la recherche d'une deuxième solution à singularité. Cinématiquement, la principale différence est que la formulation de Bohm s'appuie sur l'accélération alors que chez de Broglie, la relation fondamentale relie la vitesse à la phase de l'onde ψ par l'équation de guidage $\boldsymbol{v} = \frac{\nabla S}{m}$.[84] L'équation fondamentale de la mécanique bohmienne se présente sous la forme :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\boldsymbol{\nabla} S)^2}{2m} + V - \frac{\hbar^2}{2m}\frac{\Delta R}{R} = 0 \tag{1.26}$$

Cette relation correspond à la partie réelle de l'équation de Schrödinger $i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right)\nabla^2\psi + V\psi$ qui prend pour solution $\psi = R\,\mathrm{e}^{i\frac{S}{\hbar}}$ (avec $R(x,t)$ et $S(x,t)$ des fonc-

83. David Bohm, «A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 1», *Phys. Rev.* 85, n° 2 (1952) : 169.
84. Bacciagaluppi et Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads*, 227.

tions réelles). Elle est semblable à l'équation de Hamilton-Jacobi de la mécanique classique à la notable différence près du terme $Q = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\Delta R}{R}$. Bien que sa forme soit particulière, il est de même dimension qu'un potentiel et il est pour cette raison appelé le « potentiel quantique » par Bohm. En assimilant $-\frac{\partial S}{\partial t}$ à l'énergie E, ce qui est cohérent puisque S est de la même dimension que l'action, la relation (1.26) s'écrit :

$$E = \frac{(\boldsymbol{\nabla} S)^2}{2m} + V + Q \tag{1.27}$$

Qui peut être ramenée sous une forme newtonienne :

$$m\frac{d^2\boldsymbol{x}}{dt^2} = -\boldsymbol{\nabla}(V(x) + Q) \tag{1.28}$$

Cette dernière est saisissante. Tout se présente comme si la mécanique quantique différait de la mécanique newtonienne par le simple ajout d'une nouvelle force dérivée d'un nouveau potentiel. Ce potentiel est, en l'occurrence, identique à celui introduit par de Broglie (cf. équation (1.21) page 31) développé au premier ordre. De plus, les équations (1.26) et (1.28) respectent le principe de continuité puisque le potentiel quantique disparaît lorsque la constante de Planck h tend vers zéro, redonnant ainsi les équations de la mécanique classique. Cependant, cette apparente simplicité est trompeuse. En fin de compte, la difficulté n'est que déplacée pour être enfermée dans le potentiel quantique Q. Pour les systèmes composés de plusieurs particules, ou lors de l'interaction d'une particule avec un système de mesure, ce dernier introduit un phénomène de non-localité dans l'équation du mouvement. En effet, sa dépendance particulière à l'amplitude R de l'onde, qui est fonction des coordonnées de l'ensemble des particules, implique que même lorsque celle-ci tend vers zéro, ce qui est le cas lorsque la distance entre les particules atteint une valeur macroscopique, le potentiel quantique ne s'annule pas et peut même prendre des valeurs infinies. Lorsque Bohm, accompagné de Jayme Tiomno et Ralph Schiller, considèrera les effets de spin, ceux-ci apparaitront également sous forme d'un potentiel additionnel (voir la section 6.1 page 179).

Cette analogie de Bohm d'avec la mécanique classique se poursuit en regardant maintenant la partie imaginaire de l'équation de Schrödinger :

$$\frac{\partial R^2}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla} \cdot \left(R^2.\boldsymbol{v}\right) = 0 \tag{1.29}$$

L'équation (1.29) est analogue à l'équation de continuité d'un fluide de densité $\rho = R^2$. Bohm l'interprète comme la densité de probabilité $P = R^2$ que les particules se déplacent à une vitesse définie par le gradient de la phase S.

Par la forme newtonienne de l'équation de mouvement, l'interprétation de Bohm est une représentation discontinue de la matière, à la manière de la mécanique du

point matériel qui la différencie conceptuellement de la dynamique broglienne qui, au contraire, insiste sur la continuité de la matière. Le parti pris de la continuité est principiel dans le programme d'unification des aspects corpusculaires et ondulatoires. Il figure explicitement dans le premier chapitre de sa thèse de doctorat lorsque de Broglie précise que la localisation du phénomène périodique à l'intérieur du « morceau d'énergie» n'a pas beaucoup de sens, car « ce qui caractérise l'électron comme atome d'énergie ce n'est pas la petite place qu'il occupe dans l'espace, je le répète qu'il l'occupe tout entier, c'est le fait qu'il est insécable, non subdivisible, qu'il forme une *unité*.»[85] Dans la théorie de la double solution, la continuité s'exprime par le biais de la fonction f, amplitude de la fonction d'onde Ψ dont la forme spécifique permet de localiser le corpuscule au milieu d'un phénomène étendu. Une autre différence avec la théorie de de Broglie est que, dans le modèle bohmien, la relation de guidage n'est pas inhérente à l'interprétation. Dans la théorie de la double solution, elle dérive directement de l'équation de Klein-Gordon. Bohm ne la considère cependant pas comme une relation fondamentale de la théorie, mais elle lui semble justifiée à l'échelle atomique. Il considère qu'à des échelles de temps et d'espace inférieure à l'échelle atomique, pour lesquelles il présume que les statistiques quantiques habituelles ne seront plus valides, cette relation sera en toute probabilité substituée par une autre. De plus, Bohm pense que le champ Ψ ne satisfera plus à une équation linéaire comme celle de Schrödinger et qu'à l'équation de mouvement (1.28) s'ajoutera un terme non linéaire.[86] L'étude des singularités du champ Ψ et la recherche d'une équation non linéaire seront au cœur des premières investigations poursuivies par le groupe de l'IHP, en particulier par Jean-Pierre Vigier (voir la section 3.2 page 97).

La théorie de la mesure et le retour sur l'objection de Pauli

Rétrospectivement, la principale contribution de Bohm est son analyse du processus de la mesure, objet de son second article. Au cours de la longue histoire des débats autour de l'interprétation de la mécanique quantique, le « problème de la mesure» s'est imposé comme le problème central, véritable pierre de touche des différentes interprétations de la théorie quantique. Ce problème de la mesure est rapidement décelé. Déjà en 1935, Schrödinger, par l'intermédiaire de sa célèbre expérience de pensée du chat « à la fois mort et vivant», met en lumière le paradoxe du processus de mesure en imaginant une passerelle avec le monde macroscopique.[87] Ce problème provient

85. de Broglie, « Recherches sur la théorie des quanta», 34.

86. Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 1», 178-179.

87. Erwin Schrödinger, «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik», *Naturwissenschaften* 23, n° 48 (1935) : 807-812 ; On peut trouver une traduction en français de l'article original dans : Erwin Schrödinger, «La situation actuelle en mécanique quantique», in *Physique quantique et représentation du monde*, trad. F. de Jouvenel, Annie Bitbol-Hespériès et Michel Bitbol (Paris : Le Seuil, coll. « Points-Sciences», 1992), 90-140.

de la contradiction entre l'évolution temporelle des états quantiques, gouvernés par l'équation de Schrödinger, et le postulat de l'effondrement de la fonction d'onde lors d'une mesure. Tandis que l'évolution des états est unitaire (conservation des probabilités) et déterministe, la rencontre du système avec un appareil de mesure met un terme à la superposition des états d'une manière non déterministe (impossibilité de prédire le résultat de la mesure à partir de l'équation de Schrödinger) et non unitaire (les autres résultats possibles de la mesure disparaissent). La mesure est la seule interaction qui brise l'unitarité de la théorie, ce qui lui confère *de facto* un statut particulier. Au contraire, dans la théorie des variables cachées, la mesure ne possède pas ce statut particulier et elle est traitée comme un cas particulier d'interaction. Bohm propose ainsi une description réaliste de la mesure.

Les variables cachées de Bohm diffèrent sensiblement de l'onde pilote de de Broglie dans l'analyse du processus de mesure. Le principal apport de Bohm est de considérer dans la fonction d'onde totale à la fois le système observé et l'appareil de mesure. Cette manière d'envisager la mesure est identique à celle présentée dans son livre *Quantum Theory*. Dans l'acte de mesure intervient un hamiltonien d'interaction H_I entre le système, composé d'une particule, et l'instrument de mesure. Dans le cas d'une mesure de l'observable de position Q dont la valeur attendue est q (qui correspond, dans le formalisme standard, à la valeur propre de l'opérateur associé à l'observable Q), Bohm donne à cet hamiltonien la forme $H_I = -aQp_y$, où a est une constante et p_y le moment conjugué de y selon la coordonnée de position de l'appareil de mesure. Cet hamiltonien couple entre eux le système et l'appareil de mesure. Il est caractérisé par Bohm comme étant de type « impulsif », c'est-à-dire que l'interaction demeure suffisamment courte et intense pour que les changements d'état de la particule et de l'appareil pris isolément puissent être négligés pendant toute la durée du processus. La fonction d'onde (particule + appareil de mesure) dans son état initial avant interaction est décomposable en la somme des fonctions propres ψ_q associées aux coefficients d'expansion c_q, avec $\boldsymbol{x}$ la coordonnée de la particule et y celle de l'appareil de mesure :

$$\Psi_0(\boldsymbol{x}, y) = \psi_0(\boldsymbol{x}) g_0(y) = g_0(y) \Sigma_q c_q \psi_q(\boldsymbol{x}) \tag{1.30}$$

L'hamiltonien de type impulsif permet d'écrire l'équation de Schrödinger sous la forme simplifiée :

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -aQp_y\psi \tag{1.31}$$

La solution s'exprime par une somme de fonctions :

$$\Psi(\boldsymbol{x}, y, t) = \Sigma_q c_q \psi_q(\boldsymbol{x}) g_0 \left(y - aqt \big/ \hbar^2 \right) \tag{1.32}$$

Cette solution indique que la valeur finale de y est directement corrélée à la valeur

propre q. La variable y entre dans l'un des paquets de la fonction d'onde. Les différents paquets $g_0(y - aqt/\hbar^2)$ qui correspondent aux différentes valeurs de q sont séparés les uns des autres, dans l'espace des y, d'une distance $\delta y = at\delta q/\hbar^2$. Si la précision de la mesure Δy est très inférieure à la distance δy séparant deux trains d'onde adjacents, alors la fonction d'onde de la particule se réduit à ψ_q, comme dans l'ISMQ. Au bout d'un certain temps, ces différents paquets vont cesser de se chevaucher dans l'espace. Les autres trains d'ondes peuvent donc être ignorés et la fonction d'onde se réduit alors à :

$$\Psi(\boldsymbol{x}, y, t) = \psi_q(\boldsymbol{x}) g_0\left(y - aqt/\hbar^2\right) \tag{1.33}$$

L'appareil de mesure agit sur le système comme un analyseur de spectre décomposant la fonction d'onde en plusieurs trains d'ondes. La particule est confinée dans le train d'onde dans lequel elle se trouve après l'interaction avec l'appareil de mesure, car les autres ne peuvent plus influer sur son potentiel quantique. Bohm donne ainsi une explication du processus de mesure sans recourir au postulat de réduction du paquet d'onde de l'ISMQ.[88] L'intégration de l'appareil de mesure dans la fonction d'onde totale implique donc qu'une observable n'est pas une propriété du système seul, mais bien une valeur partagée entre le système et l'appareil de mesure, résultat de leur interaction mutuelle.[89] En raison de la forte sensibilité du potentiel quantique aux petites fluctuations lors de l'interaction, il est impossible de déduire l'état initial du système à partir de son état final. Réciproquement, si, par un quelconque moyen, toutes les positions initiales des particules constituantes du système et de l'appareil de mesure étaient connues, il serait alors possible de prédire avec certitude dans quel paquet d'onde se trouvera la particule après interaction. C'est en ce sens que la théorie prend le qualificatif de « variables cachées». La connaissance de la position initiale permettrait, par la même occasion, de déterminer l'impulsion par application de la relation de guidage $\boldsymbol{v} = \frac{\nabla S}{m}$, en contradiction apparente avec les relations d'indétermination de Heisenberg entre variables conjuguées qui ne commutent pas entre elles, telles la position et l'impulsion.

Ces relations prennent une tout autre signification par rapport à l'ISMQ. Elles ne concernent que les valeurs des observables mesurées et ne s'appliquent pas aux variables « cachées». Elles sont la conséquence de la prédictibilité uniquement statistique des résultats d'une mesure, causée précisément par l'incapacité de connaitre, en l'état actuel de la théorie, les paramètres initiaux. Ces statistiques correspondent à la distribution des résultats attendus lorsqu'un grand nombre de mesures est réalisé sur des systèmes préparés de manière identique selon le sens que donne l'ISMQ à ce terme, c'est-à-dire des systèmes de même fonctions d'onde. Dans l'exemple ci-dessus, en normalisant la

88. David Bohm, «A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 2», *Phys. Rev.* 85, n° 2 (1952) : 180-182.
89. Ibid., 183.

fonction d'onde, ce qui ne modifie pas le potentiel quantique, la probabilité que la particule entre dans le *q-ième* paquet est $P_q = \left|c_q\right|^2$, identiquement à la règle de Born. En répétant plusieurs fois de suite la mesure de Q sur le système, la valeur de q demeure identique, comme dans l'ISMQ, puisque le système se trouve déjà dans l'état $\Psi(\boldsymbol{x}, y, t) = \psi_q(\boldsymbol{x}) g_0(y - aqt/\hbar^2)$. Si l'observateur souhaite ensuite déterminer la valeur d'une observable P (selon une variable z de l'appareil de mesure) qui ne commute pas avec Q, celle-ci transforme le système, après interaction, en la somme de ses fonctions propres $\Psi(\boldsymbol{x}, y, z, t) = \Sigma_p a_{p,q} \Phi_p(\boldsymbol{x}) g_0\left(z - apt/\hbar^2\right)$. Puis, après un temps de relaxation, les différents trains d'onde se séparent dans l'espace des z, et le système se trouve désormais dans l'état : $\Psi(\boldsymbol{x}, y, z, t) = a_{p,q} \Phi_p(\boldsymbol{x}) g_0\left(z - apt/\hbar^2\right)$ La probabilité d'obtenir une valeur p particulière est $\left|a_{p,q}\right|^2$. Or, comme par définition le système ne peut être dans un état propre à la fois de Q et de P, il en résulte que la détermination simultanée de leurs valeurs est impossible, conformément aux relations d'indétermination de Heisenberg.

Ces considérations sur la mesure permettent à Bohm de complètement répondre à l'objection posée par Pauli. À noter que cette partie de l'article est un ajout sous forme d'un appendice absent de la première version de l'article.[90] Elle est consécutive aux premiers retours de Pauli grâce à qui il apprend l'existence de la théorie de de Broglie et qui le prévient du problème des collisions inélastiques. En sus de répondre à Pauli, cet appendice permet à Bohm de se démarquer clairement de la théorie de l'onde pilote, en démontrant la supériorité et l'originalité de son modèle sur celui de de Broglie. Au contraire de ce dernier, Bohm ne prend pas pour exemple de collision celle de l'électron avec un rotateur plan, mais celle d'un électron avec un atome d'hydrogène. Il n'utilise donc pas l'analogie de Fermi du réseau de diffraction infini qui posait problème en 1927. Il pointe d'ailleurs que l'utilisation de l'onde plane monochromatique est « d'une trop grande abstraction » et la substitue par un paquet d'onde dont l'emploi, conjointement à son explication particulière de la mesure, permet aisément de traiter la collision et de retrouver ainsi les valeurs d'énergies attendues.[91]

Ainsi présentée, la théorie de Bohm s'assure de rendre compte de l'intégralité des résultats de l'ISMQ. Bohm réussit une prouesse en établissant un modèle cohérent avec sa vision réaliste et déterministe des phénomènes physiques et entièrement compatible avec l'ISMQ, ce qui semblait jusque-là exclu. Les deux articles sont acceptés pour publication dans le numéro de janvier de la prestigieuse revue *Physical Review*.

90. Appendice B, Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 2 », 191-193.
91. Bacciagaluppi et Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads*, 248-267.

1.2.3 | La conspiration du silence

L'accomplissement de Bohm, à son grand désarroi, ne reçoit pas le soutien escompté des principales figures de la physique. Au Brésil, peu de temps après la parution des articles dans *Physical Review*, il confesse à son amie Miriam Yevick sa crainte que les « grosses pointures» n'organisent une « conspiration du silence».[92]

C'est sans surprise que les plus vives critiques proviennent des défenseurs actifs de l'orthodoxie. Parmi eux, deux physiciens se distinguent par leur virulence : Pauli et Rosenfeld qui sont, tout au long des années 1950, les plus fervents défenseurs de l'orthodoxie contre l'hérésie que représentent les variables cachées en mécanique quantique. Pauli, l'un des premiers interlocuteurs de Bohm à Princeton, reconnait que la théorie est désormais logiquement cohérente après l'ajout de l'appendice sur les cohésions inélastiques. Toutefois, il la considère comme inutile, en qualifiant l'ajout d'entités non mesurables de posture métaphysique.[93] Dans la même veine, Léon Rosenfeld, proche de Bohr, nie l'existence d'une quelconque controverse sur les fondements de la mécanique quantique et ne souhaite pas entrer dans une polémique contre la complémentarité qui n'existerait tout simplement pas. Sans surprise, le diagnostic d'Oppenheimer est tout aussi sévère : Bohm serait atteint de « déviationnisme juvénile». Il ne prend pas la peine de réfuter la théorie et préfère la passer sous silence. Bohm n'espérait pas qu'Oppenheimer le soutienne sur le fond, puisqu'il est un bohrien convaincu. Néanmoins, il est affecté par l'attitude de son ancien mentor pour qui il avait tant d'estime lorsqu'il était son étudiant. Il comprend que sa réaction est en premier lieu guidée par une stratégie de distanciation politique plutôt que par des considérations scientifiques. Oppenheimer subit lui aussi les pressions croissantes de l'administration américaine.[94] Il doit rompre publiquement tous les liens avec ses anciens élèves communistes. De toute manière, il sait que le destin de Bohm est scellé et il ne peut désormais plus faire grand-chose pour l'aider à le sortir de l'impasse, mais espère encore pouvoir tirer son épingle du jeu.[95] Ce ne sera pas le cas et, en 1954, il perd son habilitation de sécurité ce qui est synonyme de mort académique. L'évènement fait la une des médias américains. Bohm, ne pouvant cacher son amertume, commente auprès de Yevick le visage grave d'Oppenheimer en une du *Time* du 14 juin qui est « une combinaison linéaire de Jésus Christ et de Judas, ou de Judas essayant de ressembler à Jésus Christ.»[96]

Bohm ne reçoit pas non plus de soutien de la part de Schrödinger et d'Einstein,

92. David Bohm, David Bohm à Miriam Yevick, 5 janvier 1952, The David Bohm Papers. Section C - Correspondence - Yevick, M.L. - C.116-C.126, Birkbeck Library, University of London, Londres ; Cité dans : Peat, *Infinite Potential*, 125.
93. Freire Jr., *The Quantum Dissidents*, 30.
94. Bird et Sherwin, *American Prometheus*, 400.
95. Peat, *Infinite Potential*, 133-135.
96. Louisa Gilder, *The Age of Entanglement : When Quantum Physics was Reborn* (New York City, NY : Alfred A. Knopf, 2008), 227.

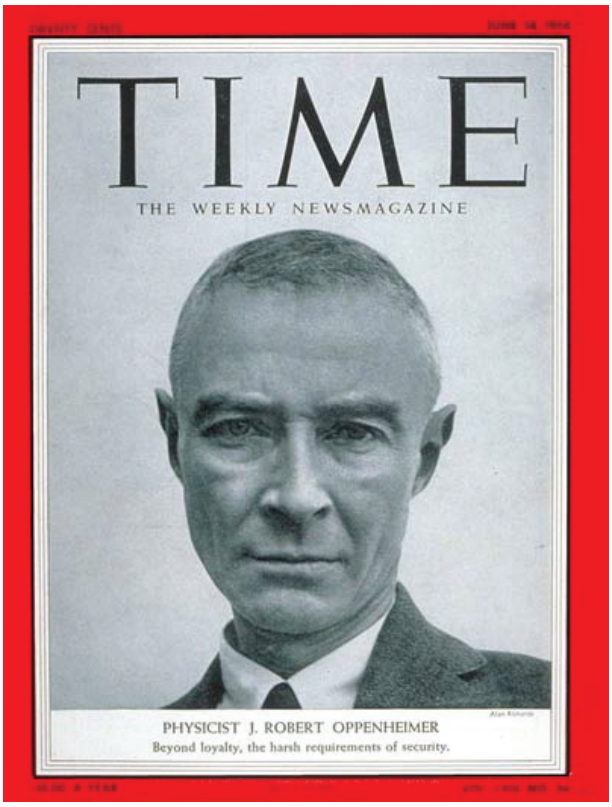


Fig. 1.4: Portrait de J. Robert Oppenheimer en une du Time Magazine de juin 1954 à la suite de sa perte d'habilitation de sécurité.

qui sont pourtant les deux principaux opposants historiques à la complémentarité. Schrödinger a depuis toujours adopté une position radicale en considérant que l'aspect corpusculaire n'a pas de réalité physique. Pour Einstein, la mécanique quantique doit être fondée sur des bases conceptuelles complètement nouvelles. À l'instar de sa théorie de la gravitation, il pense que l'interaction électromagnétique doit également pouvoir être interprétée géométriquement, ouvrant ainsi la voie vers une théorie unifiant gravitation et quanta qui préserve le déterminisme. Pour cette raison, il considère la démarche de Bohm quelque peu simpliste, puisqu'elle n'est au final qu'une réinterprétation d'équations déjà établies.[97]

Bohm espère également beaucoup de Feynman. Ils se côtoient au Brésil alors que ce dernier passe un an à Rio de Janeiro en 1951. Malheureusement pour Bohm, ses espoirs sont trop élevés. Feynman reconnait que la théorie est logiquement cohérente ce que Bohm interprète hâtivement comme un soutien potentiel. Feynman se révèle être tout au plus curieux et intrigué par la prouesse de Bohm, mais il ne va pas pour autant réorienter ses recherches en théorie quantique des champs. Feynman pratique une physique en premier lieu orientée vers l'expérimentation, bien loin des débats sur les fondements de la mécanique quantique.[98]

97. Peat, *Infinite Potential*, 132.
98. Freire Jr., *The Quantum Dissidents*, 44–45.

Cette mauvaise réception initiale ne sonne pas pour autant le glas des variables cachées. Par un chemin inattendu, la théorie trouve un écho favorable en France, chez de jeunes physiciens marxistes, tout comme Bohm. Cependant, ces physiciens ont la particularité de ne pas être des physiciens quantiques. Ils vont ainsi porter un regard vierge sur le plan théorique, mais intéressé sur le plan philosophique. En outre, l'un d'entre eux, Jean-Pierre Vigier est depuis peu l'assistant de de Broglie à l'IHP. Vigier va ainsi tenter d'obtenir le ralliement de de Broglie et constituer un groupe dédié au développement de l'ICMQ.

Chapitre 2

La réception inattendue de la théorie des variables cachées de David Bohm en France

En apprenant l'existence de la théorie de l'onde pilote de Louis de Broglie, David Bohm, suivant les recommandations de Pauli, lui en envoie une copie avant publication. C'est une version intermédiaire que reçoit de Broglie, qui contient vraisemblablement l'appendice sur les collisions inélastiques, mais pas la partie sur le théorème de von Neumann.[1] Dans la version finale soumise à *Physical Review*, Bohm crédite explicitement de Broglie d'avoir exploré la voie en premier, mais en prenant toutefois le soin de signaler que de Broglie l'a abandonnée prématurément faute d'avoir « porté les conclusions logiques de la théorie jusqu'au bout », alors que, pourtant, la théorie fonctionne.[2] Cette précision n'est pas fortuite et laisse transparaitre une ambivalence. Bohm, qui pense jusque-là sa théorie totalement originale, doit désormais composer avec de Broglie, qui pourrait certes devenir un appui potentiel, alors qu'il en manque tant, mais également lui faire de l'ombre pour ce qui est de la reconnaissance de la paternité de la théorie. Stratégiquement, Bohm va alors jouer sur plusieurs tableaux et contacter en parallèle de jeunes physiciens marxistes français dont certains sont professionnellement proches de de Broglie, en l'occurrence Évry

1. Aucune trace de la correspondance n'a survécu à notre connaissance, que ce soit dans les archives de David Bohm ou celles de Louis de Broglie. Dans des propos recueillis trente-cinq ans plus tard, David Bohm insinue que c'est la toute première version qui est envoyée, c'est-à-dire sans l'appendice sur les collisions inélastiques. Basil J. Hiley et F. David Peat, éds., *Quantum Implications : Esssays in Honour of David Bohm* (Londres : Routledge Kegan & Paul, 1987), 36 ; Mais, dans une lettre à Évry Schatzman datée de l'automne 1951, il précise bien que sa théorie « conduit à toutes les prédictions expérimentales données par l'interprétation standard », ce qui suggère qu'elle contient la partie sur les collisions inélastiques ajoutée après ses échanges avec Pauli. David Bohm, David Bohm à Évry Schatzman, [Fin septembre 1951 ?], Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

2. Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 1 », 167.

Schatzman, Jean-Pierre Vigier et André Régnier, qu'il va tenter de convaincre de le soutenir dans son entreprise. Ce bref épisode qui s'étend sur un peu plus d'une année, de l'été 1951 à l'automne 1952, constitue l'objet de ce chapitre. Il marque le début de l'étroite collaboration entre Bohm et les physiciens de l'IHP.

2.1 L'épineux problème de Broglie

À la réception du courrier de Bohm contenant le manuscrit, de Broglie se fend d'une note aux *CRAS* publiée le 17 septembre 1951. Sa réaction est pour le moins négative. Il estime en effet que « Bohm reprend exactement la théorie de l'onde pilote qu'[il avait] développée dans une série d'articles entre 1926 et 1928»[3] et qu'elle ne peut donc pas, en l'état, prétendre être une alternative viable à l'ISMQ. Il rappelle les principales causes de son abandon qui sont de natures physiques et conceptuelles. Sur le plan de la physique, il y a les critiques de Pauli sur les collisions inélastiques, auxquelles Bohm répond spécifiquement dans son deuxième article. Il y a également le comportement étrange d'un électron dans son état fondamental (non excité) s qui, d'après la théorie, est immobile par rapport au noyau. Ce résultat semble en apparence contradictoire avec la mécanique quantique, dans laquelle la notion de particule au repos n'existe pas, ce qui violerait les inégalités de Heisenberg ($\Delta p \cdot \Delta x \geqslant \hbar/2$). Une particule au repos posséderait une quantité de mouvement nulle (donc $\Delta p = 0$) et pourrait parfaitement être localisée. Ce fait est également connu de Bohm qui le traite dans la partie sur les cas stationnaires (lorsque l'énergie est une constante du mouvement, c'est-à-dire indépendante du temps). Cette étrange absence de mouvement s'explique par la compensation du potentiel classique V par la force engendrée par le potentiel quantique Q. Cependant, il n'y a aucune violation des relations de Heisenberg, puisque cette vitesse nulle n'existe qu'en tant que variable cachée, avant tout acte de mesure.[4] Toutefois, de Broglie rappelle que les difficultés les plus fondamentales sont conceptuelles. Il en cible trois : la non-localité, la description des corpuscules dans l'espace de configuration et la complexité de l'onde Ψ. En conséquence, de Broglie estime que l'onde Ψ ne peut être qu'une onde de probabilité. La conclusion de de Broglie est sans appel : la tentative de Bohm est louable, mais elle ne permet toujours pas de préserver une représentation classique des phénomènes quantiques. Pour Bohm, les difficultés conceptuelles soulevées par de Broglie sont des propriétés propres au champ quantique. La non-localité est une caractéristique du potentiel quantique défini dans l'espace de configuration. L'onde Ψ peut être considérée à la fois comme un champ physique, puisque d'elle découle le potentiel quantique, et comme une densité

3. Louis de Broglie, «Remarques sur la théorie de l'onde pilote», *CRAS* 233 (1951) : 641-644.
4. Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 1», 173.

de probabilité, car elle satisfait à l'équation de continuité $\frac{\partial P}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla} \cdot (P.\boldsymbol{v}) = 0$.[5]

La réponse de de Broglie exaspère quelque peu Bohm qui s'en plaint auprès d'Évry Schatzman. Bohm reproche à Broglie de n'avoir pas lu son article avec une attention suffisante et voit dans son attitude un brin de mauvaise foi :

> J'ai reçu récemment une lettre de de Broglie, dans laquelle il se donne beaucoup de mal pour revendiquer le crédit de l'idée[des variables cachées]. Ma réponse a été d'admettre qu'il a suggéré la méthode en 1926, mais de souligner que parce qu'il ne l'a pas portée jusqu'à ses conclusions logiques, il est arrivé à la conclusion erronée que cette idée ne fonctionne pas. D'autre part, le principal nouvel élément que j'ai ajouté est de montrer (particulièrement la construction d'une théorie de la mesure) que cette interprétation conduit à tous [Souligné dans le texte] les résultats expérimentaux donnés par l'interprétation habituelle.[6]

Le reproche parait, du point de vue de Bohm, légitime, en ce qui concerne les objections physiques, puisque la théorie de Bohm est désormais cohérente avec l'ISMQ. Toutefois, les critiques conceptuelles mettent en lumière les divergences d'approche entre les deux modèles. Vraisemblablement, Bohm a seulement connaissance de la théorie de l'onde pilote, mais pas du projet originel de la double solution qui est une concession jugée insatisfaisante par son auteur (voir la section 1.1.4 page 28). Sans doute, cette méconnaissance explique l'incompréhension de Bohm. Cette hypothèse est corroborée en examinant les travaux de de Broglie cités par Bohm dans son article. Il s'agit d'une traduction de l'ouvrage de 1930 intitulé « Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire»[7], complétée par trois notes aux *CRAS* de 1926 et 1927, et du compte rendu du ve Conseil Solvay. Le principe de la double solution n'est explicité dans aucune de ces sources, mis à part dans une note de 1927, de façon succincte, où il apparait uniquement en conclusion, en l'état d'hypothèse de travail.[8] Par contre, l'article « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement» de 1927, qui présente la version la plus aboutie de la double solution, ne figure pas parmi les références de Bohm.

Toutefois, la fin de cette lettre à Schatzman suggère une attitude paradoxale de Bohm envers de Broglie. En effet, celui-ci semble, en dernier ressort, s'accommoder de cet accueil négatif :

> En ce qui concerne les personnes comme de Broglie qui ont eu l'idée d'une interprétation similaire de la théorie quantique, mon attitude est que si un

5. Ibid., 171-172.
6. Bohm, David Bohm à Évry Schatzman.
7. Louis de Broglie, *An Introduction To The Study Of Wave Mechanics*, trad. H.T. Flint (New York, NY : Dutton, 1930).
8. Louis de Broglie, «La structure atomique de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire», *CRAS* 184 (1927) : 273-274.

> homme trouve un diamant et, ne réalisant pas sa valeur, s'en débarrasse, alors la pierre appartient à la première personne qui la retrouve et prend conscience de sa valeur.[9]

Le paradoxe est que, comme expliqué en conclusion du précédent chapitre, Bohm redoute l'absence de réaction de la part des « grosses pointures». Son départ proche pour le Brésil pourrait aggraver son isolement et il doit se lancer en quête de soutiens. Dans cette perspective, de Broglie serait un premier appui sérieux. Même si, après la guerre, de Broglie ne peut plus être considéré comme un élément moteur du développement de la physique française, il n'en demeure pas moins qu'il jouit d'un grand prestige et demeure un personnage incontournable dans le monde académique français. Il est secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences et l'IHP, où il effectue ses recherches, qui demeure un lieu d'excellence de la physique théorique française malgré la concurrence de nouvelles institutions scientifiques. De Broglie et ses proches possèdent également le quasi-monopole de l'enseignement de la physique théorique à la Sorbonne, place forte de l'enseignement des sciences en France jusqu'à la décentralisation de la fin des années 1950.[10] Pourtant, Bohm ne cherche pas la conciliation avec de Broglie. Il minimise au contraire la contribution du Français, en se revendiquant être le « propriétaire» de la théorie, selon l'argument qu'il l'a redécouverte et perfectionnée tout seul. Bohm est, pour une question d'éthique scientifique, contraint de faire part de sa théorie à de Broglie et de le créditer à cause de ses échanges avec Einstein et Pauli. C'est cependant une solution diplomatique. L'existence de la théorie de l'onde pilote est embarrassante puisqu'éventuellement à l'origine d'une querelle de priorité.[11] Nous verrons plus loin dans ce chapitre que Bohm se méfie de de Broglie dans les premières années. Quand ce dernier se décidera à reconsidérer sa position sur la théorie des variables cachées en 1952, sous l'impulsion de son entourage à l'IHP, Bohm tentera de le tenir à l'écart et de le court-circuiter, privilégiant les relations directes avec ses autres nouveaux collaborateurs. En effet, comme en témoigne la correspondance avec Évry Schatzman, de Broglie n'est pas le seul physicien français auquel Bohm s'adresse. Il lance une bouteille à la mer en envoyant également une copie de son manuscrit à l'astrophysicien français en espérant attirer l'attention d'autres jeunes physiciens marxistes. Cette stratégie porte ses fruits et permet d'attirer l'attention de trois jeunes physiciens parisiens : Évry Schatzman, Jean-Pierre Vigier et, dans une moindre mesure, André Régnier. Ils vont aider Bohm en orientant tout ou partie de leurs recherches vers l'élaboration de l'ICMQ.

9. À noter que Bohm utilise la même analogie du diamant dans une lettre à Pauli écrite à la même période. David Bohm à Wolfgang Pauli (octobre 1951), 389-393.
10. Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960)», 219-221.
11. Freire Jr., *The Quantum Dissidents*, 133.

2.2 La jeunesse, flamme de la révolution

2.2.1 Évry Schatzman, premier ambassadeur en France de l'interprétation causale

Bohm s'adresse en premier à Schatzman, ce qui parait surprenant au premier abord dans la mesure où son domaine de prédilection n'est absolument pas les quanta. Bohm récupère le contact de Schatzman par l'intermédiaire du professeur Jule Gregory Charney, également de Princeton et accessoirement le père des modèles météorologiques modernes, qui lui suggère d'envoyer son manuscrit au jeune astrophysicien :

> Cher Professeur Schatzman,
>
> Sur la suggestion du Docteur Jules Charney, je vous écris au sujet de la théorie de Vigier et Renier.[12] Je vous ai envoyé (également à Rénier) une copie de mon manuscrit "A suggested interpretation of the Quantum Theory in terms of Hidden Variables" qui sera publié dans le numéro du 15 décembre de Physical Review.[13]

Schatzman voyage un an à Princeton entre 1948 et 1949[14] et c'est à cette occasion qu'il rencontre Charney. Le météorologue a gardé une bonne opinion du jeune Français et leurs échanges l'ont d'ailleurs inspiré dans ses recherches sur les ondes de Rossby.[15] L'explication la plus probable est que Charney est parfaitement au courant de l'adhésion de Schatzman au communisme et, qu'à ce titre, il a judicieusement pensé que les travaux de Bohm l'intéresseraient. En parallèle de son activité académique, Schatzman est, à la fin des années 1940, un militant actif et convaincu du PCF dont le parcours est marqué par la guerre.[16] Contraint de quitter Paris occupé, il se réfugie à Lyon au début 1942 au laboratoire de physique de Max Morand où il rencontre Eugène Cotton, le fils d'Aimé, et D. Cavassilas, deux étudiants communistes. Il souhaite participer aux activités clandestines, motivé par l'arrestation de son père, Benjamin Schatzman, en 1940. Afin d'échapper au Service de Travail Obligatoire (STO), il part ensuite avec sa femme, sous la fausse identité d'Émile Sellier, pour l'observatoire de Haute-Provence de juillet 1943 jusqu'à la fin de la guerre. Dans sa fuite, il est aidé par Léopold Vigneron, chercheur au laboratoire de Frédéric Joliot-Curie, qui lui fournit

12. Il s'agit du physicien français André Régnier, selon l'orthographe corrigée par Schatzman dans sa réponse.
13. Bohm, David Bohm à Évry Schatzman.
14. Évry Schatzman, entretien avec Jean-François Picard, 24 février 1987, Archives orales du CNRS, http://www.histcnrs.fr/archives-orales/schatzman.html.
15. Richard S. Lindzen, Edward N. Lorenz et George W. Platzman, éds., *The atmosphere - a challenge : the science of Jule Gregory Charney* (Boston, MA : American meteorological society, 1990), 209.
16. Pour une notice biographique de Schatzman, voir : Michel Pinault, «SCHATZMAN Évry, Léon», sous la dir. de Claude Pennetier, *Le Maitron en Ligne*, 7 septembre 2015, http://maitron-en-ligne.univ-paris1.fr/spip.php?article168590.

de faux papiers, et par son professeur Jean Dufay, directeur des observatoires de Lyon et de Haute-Provence.[17] L'engagement militant de Schatzman prend de l'envergure à partir de 1946. Il adhère au Syndicat National de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique-Fédération de l'Éducation nationale (SNESRS-FEN) et à l'Union rationaliste. Il est membre de l'Association des Travailleurs Scientifiques, créée par des scientifiques proches de Frédéric Joliot-Curie en 1945, et participe à l'assemblée générale de la Fédération Mondiale des Travailleurs Scientifiques (FMTS), à Paris, en avril 1951. Au PCF, il milite dans la cellule de l'Institut d'astrophysique de Paris, rattachée à la section du XIVe arrondissement.

Bohm, à la recherche de soutiens, a suivi les conseils avisés de Charney. Il n'y a aucun doute que Bohm s'adresse à Schatzman au moins autant en communiste qu'en physicien. Sans se référer explicitement au marxisme, peut-être pour se protéger en cas d'interception du courrier ce qui pourrait potentiellement aggraver son cas, tout dans les arguments et la phraséologie utilisés rappelle cette philosophie. Déjà son article se réfère subtilement au léninisme lorsque Bohm y critique le positivisme et l'empirisme des partisans de la complémentarité qu'il assimile à la philosophie d'Ernst Mach.[18] Selon Bohm, refuser les variables cachées sous prétexte qu'elles ne seraient pas observables actuellement est un argument semblable à celui des partisans de l'énergétisme de la fin du XIXe siècle, comme Mach, contre l'existence des atomes. Cette critique fait directement écho à l'ouvrage *Matérialisme et Empiriocriticisme* écrit en 1908 par Lénine contre ce même Mach et ses admirateurs au sein de la fraction bolchevique du Parti ouvrier social-démocrate de Russie.[19] Dans sa lettre à Schatzman, Bohm présente implicitement sa théorie comme une application de la dialectique matérialiste :

> Comme vous le savez sans doute, ma position sur ces questions de physique est que le monde tout comme les observateurs qui en font partie est objectivement réel et en principe défini précisément (avec une précision arbitrairement élevée), et assujetti à des lois causales qui s'appliquent à chaque cas individuel et pas seulement statistiquement. Cependant, il y a probablement un nombre infini de niveaux de réalité et en cela une théorie complète[souligné dans le texte] ne sera jamais obtenue. [...] En raison du nombre infini de niveaux, l'existence d'un niveau particulier (ainsi que des lois qui s'y appliquent) peut subir des changements quantitatifs quand les conditions matérielles changent de manière appropriée. Ainsi, bien que l'univers est en principe complètement déterminé, dans la pratique, il faut considérer qu'un nombre fini de niveaux, et donc être confronté à l'apparition de nouveaux phénomènes qualitatifs, qui sont déterminés par des

17. Pour une biographie de Jean Dufay, voir : Yves Gomas, «Jean Dufay (1896-1967) professeur, astrophysicien et directeur d'observatoires» (thèse de doct., Université Claude Bernard Lyon 1, 2017).

18. Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 2», 188-189 ; Cité dans : Freire Jr., *The Quantum Dissidents*, 22.

19. Vladimir I. Lénine, *Matérialisme et Empiriocriticisme*, t. 14 de *Œuvres* (1908 ; Paris : Éditions sociales, 1962), 273.

> lois sous-jacentes, mais qui ne sont pas encore, dans la pratique, prédits par avance.[20]

Bohm exprime ici les prémisses de la théorie des « niveaux d'organisation de la nature» qui deviendra le socle philosophique de l'ICMQ. L'idée centrale est que la nature serait organisée en niveaux, qui correspondent à différentes échelles et complexités des structures, et qu'à chacun de ces niveaux est associée une théorie particulière. Il inscrit ainsi les variables cachées dans une dialectique générale des sciences physiques. La référence au marxisme est évidente. La transformation de la quantité en qualité est un concept fondamental dans la dialectique de Marx et Engels et l'idée de niveaux infinis de la matière est une référence à la célèbre thèse sur le caractère relatif et absolu de la connaissance formulée dans *Matérialisme et empiriocriticisme*.[21] Nous reviendrons plus en détail sur la théorie des niveaux au cours de la section 5.2 page 160.

En outre, il est saisissant que, dans sa lettre à Schatzman, Bohm demande de lui communiquer les travaux de Vigier et de Régnier en relativité générale. Il est généralement admis par les historiens, à partir du récit des événements relatés par de Broglie,[22] que Vigier remarque les similitudes entre les conceptions d'Einstein et de de Broglie. En effet, toutes les deux assimilent les particules à des singularités du champ (gravitationnel en relativité, quantique dans la double solution) dont les trajectoires suivent des géodésiques en relativité ou des lignes de courant en mécanique quantique. Cependant, à ce moment précis, Vigier a seulement publié dans le domaine une seule courte note aux *CRAS*, qui plus est en toute indépendance de la théorie de Bohm.[23] L'explication la plus probable est que dans sa réponse à Bohm, de Broglie a mentionné les travaux de Vigier. Néanmoins, il semble que Bohm porte un intérêt pour la relativité, peut-être en raison de ses discussions personnelles avec Einstein à l'IAS, bien qu'il ne possède pas lui-même de compétences particulières dans ce domaine. Cet intérêt de Bohm a probablement motivé Vigier à explorer plus en avant la voie du rapprochement entre l'ICMQ et la relativité.

En tout état de cause, les trois jeunes physiciens communistes sont séduits par la lettre de Bohm. Les références à la philosophie marxiste ne leur échappent pas. Schatzman lui répond à ce propos :

> Nous [Vigier, Régnier et Schatzman] sommes complètement d'accord avec votre point de vue philosophique. Toute théorie physique devrait être complètement déterministe, parce qu'une affirmation du matérialisme dialectique est qu'il y a une réalité objective et que cette réalité est connaissable, que nous pouvons construire une image de cette réalité dans notre

20. Bohm, David Bohm à Évry Schatzman.
21. Lénine, *Matérialisme et Empiriocriticisme*, 134–141.
22. de Broglie, *Nouvelles perspectives en microphysique*.
23. Jean-Pierre Vigier, «Introduction géométrique des particules élémentaires en théorie unitaire affine», *CRAS* 232 (1951) : 1187-1189.

> esprit. Toutes les théories physiques, sauf la mécanique quantique, sont construites sur de tels postulats implicites. Nous devrions être reconnaissants envers des personnes comme Vigier, comme vous, qui avez avec ténacité consacré leurs efforts à remettre la théorie quantique sur ses pieds, exactement comme la dialectique de Hegel, qui doit être remise sur ses pieds ![24]

Schatzman, élogieux, compare la démarche de Bohm à celle de Marx, en paraphrasant une citation connue de tous les communistes. L'expression la « remise sur ses pieds de la dialectique hégélienne» est une référence à la postface de la seconde édition allemande du premier livre du *Capital*, souvent employée par les communistes pour expliquer, de manière imagée, le changement de point de vue opéré par la dialectique matérialiste de Marx par rapport à la dialectique idéaliste de Hegel.[25] Ce procédé de justification de la théorie par la citation et la comparaison avec les classiques du marxisme[26] sera fréquemment utilisé, notamment pour défendre la théorie auprès des communistes français.

Bien que Schatzman soit entièrement conquis par les variables cachées, son apport personnel au développement théorique reste limité. Schatzman le confesse à Bohm, il manque de temps, entre ses recherches en astrophysique, les étudiants dont il encadre les thèses de doctorat, ainsi que son militantisme syndical et politique. Ce n'est pas pour autant qu'il est absent des discussions théoriques et il partage régulièrement son expertise avec Bohm et Vigier. Par contre, cette participation ne se concrétise pas par la publication d'articles et son unique contribution visible se restreint en une courte note aux *CRAS*, publiée conjointement par Vigier et Régnier en 1952.[27] Il est d'ailleurs convaincu que la théorie pourrait lui être utile dans ses recherches personnelles en

24. Évry Schatzman, Évry Schatzman à David Bohm, 3 décembre 1951, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

25. La citation complète est « Hegel défigure la dialectique par le mysticisme, ce n'en est pas moins lui qui en a le premier exposé le mouvement d'ensemble. Chez lui elle marche sur la tête ; il suffit de la remettre sur les pieds pour lui trouver la physionomie tout à fait raisonnable.» À noter qu'il s'agit de la traduction de Joseph Roy, qui est la seule circulant en France entre 1872 et 1983. Marx critique déjà cette traduction à l'époque. Dans la traduction de Jean-Pierre Lefebvre de 1983 qui fait désormais autorité, la précédente citation est différente et amoindrit l'effet de style : « La mystification que la dialectique subit entre les mains de Hegel n'empêche aucunement qu'il ait été le premier à en exposer les formes générales de mouvement de façon globale et consciente. Chez lui elle est sur la tête. Il faut la retourner pour découvrir le noyau rationnel sous l'enveloppe mystique.» Karl Marx, *Le Capital, Livre Premier*, trad. Joseph Roy (1872 ; Paris : Les Éditions Sociales, 1969), 29 ; À propos de la traduction du capital, voir l'introduction de Jean-Pierre Lefebvre Karl Marx, *Le Capital, Livre Premier*, trad. Jean-Pierre Lefebvre (Paris : Quadrige/Presses Universitaires de France, 1993), vi–li.

26. Nous reprenons à notre compte l'expression « classique du marxisme» telle que définie par Simon Gouz. Ces classiques regroupent la production de Marx, Engels et Lénine. Pour une étude détaillée, voir le chapitre 7 « La conception des sciences dans le marxisme de Marx, Engels et Lénine» dans : Simon Gouz, «Biographie d'une vision du monde : Les relations entre science, philosophie et politique dans la conception marxiste de J.B.S. Haldane» (thèse de doct., Université Claude Bernard Lyon 1, 2010), 543-639.

27. André Régnier, Évry Schatzman et Jean-Pierre Vigier, «Sur la répartition statistique des mouvements des particules en Mécanique quantique», *CRAS* 234 (1952) : 410-412.

astrophysique, notamment pour expliquer le vieillissement des photons qu'il pense responsable du rougissement des nébuleuses intergalactiques.[28]

En tant qu'interlocuteur privilégié de David Bohm en France, Schatzman endosse le rôle d'ambassadeur et de la théorie. Un rôle qui lui tient à cœur puisqu'il saisit chaque opportunité pour la diffuser auprès des physiciens communistes, soviétiques ou non, qu'il côtoie. Sur la demande de David Bohm, il communique les articles au Hongrois Gombás Pál au mois de juillet 1952.[29] De sa propre initiative, il en discute également avec Léon Rosenfeld avec qui il entretient jusque-là de bonnes relations. En 1950, Schatzman hésite à accepter la proposition de Patrick Blackett et Rosenfeld de déposer sa candidature pour être recruté sur une chaire d'astronomie théorique à l'Université de Manchester et ainsi les rejoindre. Schatzman refuse le poste, principalement parce qu'il se sent redevable des astrophysiciens français qui lui ont « sauvé la vie en 1943-1944», bien qu'il ait tout à fait conscience des conditions exceptionnelles de travail qui s'offriraient à lui.[30] Il sait également qu'il se trouverait en terrain amical sur le plan politique, Blackett et Rosenfeld sont notoirement connus pour leur engagement à gauche, en particulier à la FMTS. Peu de temps après avoir pris connaissance de la théorie de Bohm, Schatzman, enthousiaste, en fait naturellement part à Rosenfeld, qu'il sait marxiste. En guise de réponse, Rosenfeld envoie à Schatzman, afin de le « sortir du bourbier», une copie de l'article à paraitre dans l'ouvrage collectif en l'honneur des 60 ans de Louis de Broglie au titre explicite « L'évidence de la complémentarité».[31] À la fin du mois de mars 1952, Schatzman, avec une certaine assurance, répond à Rosenfeld sous la forme d'une longue lettre critique de l'article, dans laquelle il tente de convaincre Rosenfeld de la contradiction entre marxisme et complémentarité, à l'aide de citations de Lénine extraites de *Matérialisme et empiriocriticisme*.[32] L'argumentaire de Schatzman manque doublement sa cible : Rosenfeld, en plus de figurer parmi les plus ardents avocats de la complémentarité bohrienne, est également un pourfendeur de la philosophie léniniste dont il partage les critiques d'Anton Pannekoek.[33] La réponse de Rosenfeld est lapidaire. Il renvoie Schatzman à une meilleure

28. Évry Schatzman, Évry Schatzman à David Bohm, 21 septembre 1952, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

29. Évry Schatzman, Évry Schatzman à Pál Gombás, 28 juillet 1952, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

30. Évry Schatzman, Évry Schatzman à Léon Rosenfeld, 17 juin 1950, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/95), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

31. Léon Rosenfeld, «L'évidence de la complémentarité», in *Louis de Broglie. Physicien et penseur*, sous la dir. d'André George (Paris : Albin Michel, 1952), 43-66.

32. Évry Schatzman, Évry Schatzman à Léon Rosenfeld, 30 mars 1952, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/95), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

33. Anja Skaar Jacobsen, «Léon Rosenfeld's Marxist defense of complementarity», *Hist. Stud. Nat. Sci.* 37, n° supplément (2007) : 8–11 ; concernant les critiques de Pannekoek vis-à-vis de la philosophie de Lénine, voir son ouvrage le plus célèbre sur la question : Anton Pannekoek, *Lenin As Philosopher : A Critical Examination of the Philosophical Basis of Leninism*, trad. Lance Richey (1938 ; Milwaukee, WI : Marquette University Press, 2003).

lecture de son article pour lequel il n'aurait pas fourni un effort suffisant de compréhension.[34] En mai 1952, Rosenfeld fait une allusion à ses échanges avec Schatzman auprès de Bohm :

> Cher Bohm,
>
> Je ne devrais certainement pas entrer dans une controverse avec vous ou qui que ce soit d'autre au sujet de la complémentarité, pour la simple raison qu'il n'y a pas le moindre point controversé à ce sujet. [...]
>
> Je suis enclin à rétorquer que c'est seulement parmi vos admirateurs parisiens que je remarque des signes inquiétants de mentalité primitive.[35]

Rosenfeld, à son habitude, participe à la controverse en niant son existence. Les « admirateurs parisiens» font bel et bien allusion à Schatzman et Vigier et pas à de Broglie, comme le pense l'historienne Anna Gilder.[36] De Broglie n'a pas encore publiquement tranché en faveur d'un retour au modèle causal en mai 1952. De plus, Rosenfeld, bien que célèbre pour le ton acerbe de ses critiques, n'aurait probablement pas employé une telle expression à l'égard de son ancien professeur. L'expression prend en revanche tout son sens lorsque placée dans le contexte de la correspondance entre Schatzman et Rosenfeld.

Ces erreurs de jugement de Schatzman quant à ses éventuelles chances de succès de convaincre Rosenfeld dévoilent une certaine naïveté du jeune physicien. Schatzman est un acteur extérieur au monde quantique. Il découvre vraisemblablement, dans le même intervalle de temps, à la fois les problèmes théoriques et philosophiques soulevés par la mécanique quantique ainsi que les positions des uns et des autres, parfois à ses dépens dans le cas de Rosenfeld. La mécanique quantique semble aussi sa porte d'entrée vers une lecture et une étude attentive de l'épistémologie marxiste. Ceci est probant dans le ton employé dans sa correspondance avec Bohm, entre émerveillement et enthousiasme débordant, où il compare Bohm à Marx, ainsi que dans sa critique maladroite de l'article de Rosenfeld. Il ne faut pas l'interpréter, à notre avis, comme un signe de dogmatisme idéologique prononcé, mais plutôt comme de premiers pas sur le terrain de l'épistémologie marxiste. À l'évidence, Schatzman manque de discernement sur son interlocuteur pour lequel l'argumentaire sous forme de citations de Lénine agit comme une force répulsive. Après cet épisode malheureux, chargé de remords, il s'ex-

34. Léon Rosenfeld, Léon Rosenfeld à Évry Schatzman, 6 avril 1952, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/95), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

35. « I certainly shall not enter into any controversy with you or anybody else on the subject of complementarity, for the simple reason that there is not the slightest controversial point about it.[...] I am inclined to retort that it is just among your Parisian admirers that I notice some disquieting signs of primitive mentality.» Léon Rosenfeld, Léon Rosenfeld à David Bohm, 30 mai 1952, The David Bohm Papers. Section C - Correspondence - Rosenfeld L. - C.58, Birkbeck Library, University of London, Londres.

36. Gilder, *The Age of Entanglement*, 216–217.

cuse auprès de Rosenfeld « à la fois pour la forme et pour le contenu.»[37] Il exprime auprès de Bohm « sa crainte de s'être créé un ennemi, au moins sur le terrain de la mécanique quantique», même s'il maintient sa position :

> Rosenfeld prétend être matérialiste et marxiste. Mais son article n'est rien d'autre qu'un résumé de toute la dialectique idéaliste de Bohr et des autres. Rosenfeld est un élève de Bohr, et c'est probablement la raison.[38]

En déplacement à Varsovie pour un congrès, il fait part à Georges Cogniot, dirigeant communiste et rédacteur en chef de *la Pensée*, de sa rencontre avec Vladimir Fock,[39] qu'il tente de convaincre du bienfondé des recherches poursuivies à Paris, en insistant sur la relation entre la théorie causale et la relativité générale :

> j'ai pu discuter avec Fok [Fock] (Léningrad) sur les problèmes de mécanique quantique et de relativité, je lui ai raconté ce que nous faisons dans notre petit cercle de physiciens communistes, et cela l'a beaucoup intéressé. Je l'ai ainsi mis au courant de l'état d'avancement de nos discussions sur les fondements de la mécanique quantique et de la relativité ; en retour, j'ai reçu l'impression encourageante que nous étions sur la bonne voie et que notre organisation et nos méthodes de travail étaient bonnes.[40]

Cette impression d'un accueil positif de la part de Fock est surprenante. Le physicien soviétique est en effet lui aussi clairement identifié comme faisant partie avec Landau, Bronshtein, Tamm et Markov de la « section russe» (*soviet branch*) de l'école de Copenhague, bien qu'il ne partage pas l'entièreté des conclusions philosophiques de Bohr.[41] Vigier pense également que Fock peut être convaincu par leurs idées. En 1953, il le compte parmi des adversaires de la complémentarité, aux côtés de Blokhintzev et Frenkel « dont les critiques contre l'interprétation de Bohr s'ajoutent à celles d'Einstein et de Schrödinger.»[42] Étrangement, Vigier appuie son propos en citant l'ouvrage *Questions scientifiques*, qui regroupe des traductions en français d'articles soviétiques sur les sciences édité par les presses du PCF et qui devient dans la période une référence d'autorité pour les scientifiques communistes français.[43] Or, dans cet ouvrage, l'inter-

37. Évry Schatzman, Évry Schatzman à Léon Rosenfeld, 28 avril 1952, Léon Rosenfeld's papers, Niels Bohr Archives, University of Copenhagen, Copenhague.

38. Schatzman, Évry Schatzman à David Bohm.

39. À propos de l'interprétation de la mécanique quantique par Fock, voir : Jean-Philippe Martinez, «Vladimir Fock (1898–1974) : itinéraire externaliste d'une pensée internaliste : Antiréductionnisme et réalisme scientifique en physique moderne» (thèse de doct., Université Paris Diderot, 2017).

40. Évry Schatzman, Évry Schatzman à Georges Cogniot, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/203), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

41. Loren R. Graham, *Science, Philosophy, and Human Behavior in the Soviet Union* (New York City, NY : Columbia University Press, 1987), 322 et 337-343.

42. Jean-Pierre Vigier, «Physique relativiste et physique quantique», in *La physique quantique restera-t-elle indéterministe ?*, par Louis de Broglie (Paris : Gauthier-Villars, 1953), 99.

43. La Nouvelle Critique, éd., *Questions scientifiques (Physique)* (Paris : Les Éditions de la Nouvelle Critique, 1952).

prétation de la mécanique quantique est justement laissée aux adversaires reconnus de la complémentarité en URSS, à savoir Terletski[44] et Blokhintzev,[45] alors que les positions complémentaristes de Fock brillent par leur absence.[46] L'article de Fock, non sans raison, concerne la relativité, domaine dans lequel ses positions font autorité en URSS contrairement à celles sur la mécanique quantique.[47] Et pour cause, l'ouvrage parait pendant la période qualifiée par l'historien Loren R. Graham de « bannissement de la complémentarité » en URSS qui s'étend de 1947 à 1960, consécutive à la doctrine initiée en 1947 par Andreï Jdanov en charge de la politique culturelle du pays. Durant cette période, la complémentarité est minoritaire et ardemment critiquée par la majorité des physiciens et philosophes soviétiques qui la considère comme une variante du kantisme d'essence idéaliste. La situation se renverse totalement à partir de 1960, marquée par la visite de Bohr en URSS. Encore en 1955, Vigier transmet à Fock les travaux réalisés à l'IHP sur la prolongation de l'ICMQ à la représentation hydrodynamique qui offrent, pense-t-il, « une interprétation de la théorie quantique, apparemment conforme à votre opinion, dans laquelle chaque microparticule revêt individuellement des propriétés ondulatoires qui sont dépeintes par la fonction Ψ de la théorie conventionnelle. »[48] Fock, de manière cordiale, met fin à toute ambigüité quant à ses positions. En 1959, il communique à Vigier la transcription d'une conférence qu'il a donnée à l'IHP ainsi que différents textes qui « peuvent [lui] être utiles pour mieux connaitre et mieux comprendre [son] point de vue sur la mécanique quantique », tout « en espérant que [leurs] différences d'opinions sur la mécanique quantique ne nuiront jamais à [leurs] relations personnelles. »[49]

Enfin, Schatzman est le premier à diffuser la théorie au sein du PCF en proposant un article à la revue *la Pensée*, créée par Paul Langevin et dont la ligne éditoriale est proche du PCF. L'article, intitulé « Physique quantique et réalité »,[50] est le premier d'une longue série où les différents points de vue sur l'interprétation de la mécanique quantique vont s'affronter et créer une controverse propre au milieu intellectuel communiste français (voir la section 8.3 page 270).

44. Jakow P. Terletski, « Problèmes du développement de la théorie quantique », in La Nouvelle Critique, *Questions scientifiques (Physique)*, 131-146.
45. Dimitri I. Blokhinzev, « Critique de la conception idéaliste de la théorie quantique », in La Nouvelle Critique, *Questions scientifiques (Physique)*, 95-129.
46. Olival Freire Jr., « Quatum Controversy and Marxism », *Hist. Sci.* 7, n° 2 (1997) : 147.
47. Vladimir A. Fock, « Le système de Ptolémée et le système de Copernic à la lumière de la théorie générale de la relativité », in La Nouvelle Critique, *Questions scientifiques (Physique)*, 147-154.
48. Jean-Pierre Viger, Jean-Pierre Vigier à Vladimir Fock, 30 juin 1955, V. A. Fock Papers - 1034-3-827, Archives de l'Académie des Sciences de Russie, Saint-Pétersbourg.
49. Vladimir A. Fock, Vladimir Fock à Jean-Pierre Vigier, 8 septembre 1959, V. A. Fock Papers - 1034-3-827, Archives de l'Académie des Sciences de Russie, Saint-Pétersbourg.
50. Évry Schatzman, « Physique quantique et réalité », *La Pensée* 42–43 (1952) : 110-122.

2.2.2 | Jean-Pierre Vigier, militant-physicien

Amplement cité dans les précédentes parties, le deuxième principal protagoniste est Jean-Pierre Vigier, ami et camarade communiste de Schatzman. Alors que Schatzman est le premier interlocuteur en France de David Bohm, Vigier est, quant à lui, le physicien qui va le plus contribuer à l'élaboration du modèle en France.

Vigier nait le 20 janvier 1920 à Paris, est le fils de Françoise (née Dupuy) et de Henri Vigier.[51] Ce dernier était conseiller politique à la Société des Nations à Londres puis à Genève, et, à partir de 1946, pour l'Organisation des Nations Unies à New York, raison pour laquelle Jean-Pierre passe la plus grande partie de son enfance à Genève, où il poursuit sa scolarité au sein du lycée international. Il obtient les baccalauréats en Mathématiques et en Philosophie. Il s'inscrit à la Sorbonne en 1938 où il passe son certificat de mathématiques générales et de sciences physiques naturelles. Après la déclaration de la guerre, il s'installe à Nîmes où il prépare, au Lycée National, les concours d'entrée à l'École normale supérieure (ENS) et à Polytechnique. Admissible à l'ENS, il ne peut cependant pas poursuivre le concours pour raisons de santé. En 1940, il est mobilisé au 504e Régiment de chars de combat à Valence. Après l'armistice du 22 juin 1940, il intègre un groupement des Chantiers de Jeunesse à Foix (Ariège) jusqu'à sa démobilisation en janvier 1941. C'est dans les Chantiers de Jeunesse qu'il adhère au PCF.[52] À l'université de Montpellier, il valide deux licences, en mathématiques et en physique. À l'automne 1941, il retourne vivre chez ses parents à Genève et commence un doctorat de mathématiques sous la direction du Professeur Rolin Wavre. Il publie son premier article aux *Comptes rendus des séances de la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève* en 1942.[53] À Genève, il rencontre Tamara Caspary, fille de Peter-Curt Caspary et de Rachel Dübendorfer, « Sissy », qui est une des dirigeantes du réseau d'espionnage des Allemands pour les Soviétiques Rote Drei.[54] Le couple se

51. Diverses notices biographiques de Vigier sont déjà établies, la plupart rédigées par des proches et des collaborateurs, parmi lesquelles celles de Peter Holland et Stanley Jeffers. Cependant, diverses erreurs sont présentes ainsi que certains faits relatés difficilement vérifiables, notamment le rôle réel de Vigier au sein de la Résistance. Notre biographie se base uniquement sur les faits que nous avons pu vérifier, soit par les archives, soit par le recoupement des informations auprès des personnes ayant connu Vigier. Les épisodes invérifiables sont laissés en suspens. Peter R. Holland, « Jean-Pierre Vigier at Seventy-Five : La Lutte Continue », *Found. Phys.* 25, n° 1 (1995) : 1-4 ; Stanley Jeffers, « Preface », in *Jean-Pierre Vigier and the Stochastic Interpretation of Quantum Mechanics* (Quebec : Apeiron, 2000), iii–vi ; Pour une version publiée de la présente biographie, voir : Virgile Besson, « VIGIER, Jean-Pierre », sous la dir. de Claude Pennetier, *Le Maitron en Ligne*, 11 juin 2016, `http://maitron-en-ligne.univ-paris1.fr/spip.php?article181611`.

52. Archives de la section de montée des cadres, Élections des organismes fédéraux de Paris 1952–1966, Archives du Parti Communiste Français – 261J21/88, Archives départementales de la Seine-Saint-Denis, Bobigny.

53. Jean-Pierre Vigier, « Quelques résultats complémentaires à la théorie de l'itération des opérateurs de M. Wavre », *Compte rendu des séances de la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève* 59 (1942) : 159-162.

54. Pour une histoire détaillée de l'Orchestre Rouge, voir l'ouvrage récent : Guillaume Bourgeois, *La véritable histoire de l'Orchestre Rouge* (Paris : Nouveau Monde édition, 2015).

mariera après la guerre et, de cette union, naitront Maya et Corinne. Encore étudiant, il fréquente également des militants communistes espagnols par le biais de son ami de l'École Internationale, Manolo Azcárate, dont il embrasse la cause. Celui-ci est le fils de Pablo Azcárate, un collègue de son père Henri Vigier à la Société des Nations, qui est le dernier ambassadeur à Londres de la République espagnole. Manolo a participé à la guerre civile et se réfugie en France à la victoire de Franco et passe la guerre dans la clandestinité.[55]

Vigier continue son cursus en parallèle à l'université de Montpellier dans l'objectif de valider un certificat d'astronomie. À ce titre, il effectue des aller-retour fréquents entre les deux villes, une opportunité qu'il met à profit pour transiter du matériel politique entre les deux pays. Cette activité est risquée. Le 18 avril 1942, alors qu'il se rend à Annemasse pour prendre le train en direction de Nîmes, il est arrêté au poste-frontière de Moillesulaz. De la propagande antifranquiste, provenant d'exilés espagnols au Mexique, est dissimulée dans le cadre de sa bicyclette. Il est immédiatement transféré et incarcéré à l'hôtel Bellevue à Vichy. La police se convainc toutefois de la version présentée par Vigier, qui nie avoir connaissance de ces documents qui ont probablement été dissimulés à son insu. Comme l'enquête ne permet pas de prouver un quelconque activisme politique passé, Vigier est libéré au bout de quelques jours et il regagne Genève.[56] En parallèle, Jean-Pierre Vigier et Tamara Caspary servent pour le Rote Drei et sont connus sous les pseudonymes respectifs de Braut et Vita. Il ont été recrutés en toute probabilité par Rachel Dübendorfer. Après le débarquement allié en France, Vigier rejoint les Francs-tireurs et partisans (FTP) de Charles Tillon puis intègre la 1re armée française sous le commandement du général de Lattre de Tassigny. Blessé lors de la traversée du Rhin, il termine la guerre comme aide de camp. Il est décoré de la croix de guerre et de la Légion d'honneur.[57]

Après la guerre, Vigier poursuit son engagement au sein du PCF. Il est un militant actif et dévoué au parti. Les années 1950 sont celles de son ascension au sein de l'appareil : il est un temps secrétaire de la cellule du ve arrondissement, est élu au bureau fédéral de Paris et, enfin, membre du Comité central en 1959 où il remplace Frédéric Joliot-Curie, décédé en 1958.[58] Il aurait également continué son activité clandestine. Les services de renseignement français et anglais soupçonnent fortement le couple Vigier d'agir pour la Direction générale des renseignements de l'État-Major des forces

55. François Vigier, correpondance personnelle avec l'auteur, 19 mars 2015.
56. État Français - Gouvernement de Vichy, Arrestation de Jean-Pierre Vigier, Rapports de police, avril 1942, Archives du Ministère de l'intérieur – 2015/3 MI 1 dossier n ° 419.827 : Jean-Pierre Vigier (1942-1968), Archives nationales de France, Paris.
57. Vigier, correpondance personnelle avec l'auteur.
58. Jean-Pierre Vigier, entretien avec Michel Pinault, 13 janvier 1998, BnF, Fonds Joliot-Curie, Musée Curie, Paris.

armées (GRU), ou directement pour Rachel Dübendorfer.[59] Une de leurs tâches aurait été de démasquer un certain Alexander Foote, l'ancien opérateur radio du Rote Drei passé agent au Military Intelligence, section 6 (MI6) en 1947.[60]

FIG. 2.1: Le couple Jean-Pierre et Tamara (née Caspary) Vigier en 1942.[61]

En 1946, Vigier soutient sa thèse en mathématiques à Genève intitulée *Étude sur les suites infinies d'opérateurs hermitiens*.[62] Encore mobilisé, il est embauché au Commissariat à l'énergie atomique, crée en septembre 1945 à la demande de Charles de Gaulle. Frédéric Joliot-Curie, alors directeur du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), en devient le haut commissaire et Raul Dautry, alors ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme, l'administrateur général. Début 1946, les premiers membres du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) sont nommés. Il s'agit de Pierre Auger, Irène Joliot-Curie[63], la femme de Frédéric, Francis Perrin et le général Paul Dassault. Dassault est en responsabilité de recruter parmi les armées et obtient ainsi le détachement de Vigier.[64] Au CEA, Vigier travaille sur la pile Zoé et produit un

59. Records of the Security Service - Soviet intelligence agents and suspected agents, KV2/1622 : Jean-Pierre Vigier/Tamara Vigier (1942–1951), UK National Archives, http://discovery.nationalarchives.gov.uk/details/r/C11190822.

60. Records of the Security Service - Soviet intelligence agents and suspected agents, KV2/1614 : Alexander Foote (1942–1951), UK National Archives, http://discovery.nationalarchives.gov.uk/details/r/C11190814.

61. Records of the Security Service - Soviet intelligence agents and suspected agents, KV2/1622 : Jean-Pierre Vigier/Tamara Vigier (1942–1951), UK National Archives, http://discovery.nationalarchives.gov.uk/details/r/C11190822.

62. Jean-Pierre Vigier, «Étude sur les suites infinies d'opérateurs hermitiens» (thèse de doct., Université de Genève, 1946).

63. À propos de la vie d'Irène Joliot-Curie, voir : Louis-Pacal Jacquemond, *Irène Joliot-Curie* (Paris : Odile Jacob, 2014).

64. Michel Pinault, *Frédéric Joliot-Curie* (Paris : Éditions Odile Jacob, 2000), 348.

rapport sur les neutrons rapides.[65] Sa participation au CEA est cependant de courte durée. Le 19 mars 1950, le Mouvement mondial des partisans de la paix, proche des communistes, lance l'« Appel de Stockholm» pour protester contre la course à l'armement atomique. Consécutivement, les communistes sont évincés du CEA, Frédéric Joliot-Curie est remplacé au haut commissariat à l'énergie atomique par Francis Perrin. Vigier se retrouve alors sans emploi. Il rencontre Louis de Broglie, à la recherche d'un assistant, qui l'embauche à l'IHP où il va commencer des recherches sur les théories unitaires affines.

Paris est à cette époque avec Dublin et Princeton l'un des rares endroits où se mènent des recherches en relativité générale. Les deux principales figures françaises en relativité sont André Lichnerowicz, de la faculté des sciences de Paris, et Marie-Antoinette Tonnelat, ancienne élève de Louis de Broglie et également en poste à l'IHP. Leurs axes de recherche sont, pour Lichnerowicz, la théorie d'unification à cinq dimensions d'après les travaux de Nordström et Kaluza, et, pour Tonnelat, la théorie d'Einstein-Schrödinger. Entre 1950 et 1960, ils vont encadrer à eux deux plus d'une vingtaine de thèses sur ces sujets.[66]

Les travaux de Vigier s'inscrivent dans ceux de Tonnelat en théorie unitaire. À partir du tenseur métrique antisymétrique introduit par Schrödinger en 1948, Vigier propose une méthode géométrique pour retrouver les lagrangiens des champs des particules de Klein-Gordon (spin 0), de Dirac (spin $\frac{1}{2}$) et de Proca (spin 1). Ces travaux font l'objet d'une première publication aux *CRAS* présentée par Louis de Broglie en mars 1951.[67] Il estime cette voie féconde et projette, dans un proche avenir, de calculer les interactions entre particules. C'est en toute probabilité cet article que Bohm aimerait que Schatzman lui transmette. Comme annoncé plus haut, les recherches de Vigier prennent un tournant inattendu quand il prend connaissance de la théorie de Bohm. Vigier est immédiatement enthousiasmé par la théorie, à l'opposé de Louis de Broglie.

Parmi les raisons de cet entrain, se trouve bien évidemment l'affinité partagée de Bohm et Vigier avec le marxisme. Mais ce n'est pas l'unique motif. Il y a également un aspect théorique fort, en lien avec ses recherches en relativité générale. Vigier est en effet immédiatement interpellé par la proximité conceptuelle entre la théorie de la double solution, qu'il découvre vraisemblablement grâce à de Broglie, par ricochet de la communication de Bohm, et la relativité générale. Dans les deux théories, les particules sont représentées par des déformations d'un champ physique et sont astreintes à suivre les lignes de courants (géodésiques en relativité générale) de ce champ. Les mouvements des particules sont alors entièrement déterminés par les seules équations

65. « Théorie du ralentissement des neutrons», juillet 1949 CNRS, 19780309/27 - CNRS 2398 - Liste des rapports du C.E.A 1948–1953, Archives nationales de France, Pierrefitte-sur-Seine.

66. Hubert F. M. Goenner, «On the History of Unified Field Theories. Part II. (ca. 1930 – ca. 1965)», *Living Rev. Relativ.* 17, n° 5 (2014) : 104-114.

67. Vigier, « Introduction géométrique des particules élémentaires en théorie unitaire affine».

du champ. Cette analogie, qui ne possède encore aucune justification mathématique solide, est le véritable point de départ de ses recherches sur la théorie de la double solution. Vigier rédige une première note pour les *CRAS* le 29 octobre 1951 présentée par de Broglie. Ce dernier, certainement intrigué par l'intérêt de son jeune assistant pour ses propres travaux de jeunesse, ajoute un commentaire à la fin de la note :

> En y réfléchissant, il me paraît certain que, si l'on parvenait à justifier la théorie de l'onde-pilote, ce ne pourrait être que sous sa forme primitive de la double solution de la manière indiquée par M. Vigier à la fin de sa Note. Mais la tentative de M. Vigier se heurtera certainement à beaucoup de difficultés et d'objections.[68]

Le ton de de Broglie a manifestement changé depuis le court laps de temps qui s'est écoulé entre sa réponse à Bohm et cette courte note. Le soutien de de Broglie n'est certes pas encore acquis, mais, à l'évidence, une brèche s'ouvre dans son esprit, et ne va aller qu'en s'élargissant. Vigier joue un rôle clé dans cette reconversion en réhabilitant la théorie de la double solution qui est, selon de Broglie, l'unique voie admissible pour un retour au déterminisme dans le domaine quantique. À partir de l'automne 1951, Vigier réoriente totalement ses recherches pour se consacrer entièrement à l'ICMQ. Si l'analogie entre les théories unitaires et la double solution est incontestable, encore faut-il qu'elle dépasse ce statut en acquérant une justification mathématique. C'est ce à quoi va désormais s'employer Vigier.

2.3 Le ralliement de Louis de Broglie à l'interprétation causale

Malgré son accueil initial négatif, de Broglie change son fusil d'épaule au cours de 1952 pour se rallier définitivement à ICMQ à l'automne. Ce revirement prend un caractère officiel lors de son désormais célèbre discours au Centre International de Synthèse prononcé le 31 octobre intitulé « La physique quantique restera-t-elle indéterministe ?»[69]

2.3.1 L'homme stupide est celui qui ne change pas

Au regard des progrès spectaculaires réalisés par la physique théorique dans l'après-guerre, notamment en TQC, le moment choisi par de Broglie pour rouvrir la page de

68. Jean-Pierre Vigier, «Introduction géométrique de l'onde pilote en théorie unitaire affine», *CRAS* 233 (1951) : 1013.
69. Louis de Broglie, «La physique quantique restera-t-elle indéterministe ?», *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, n° 4 (1952) : 289-311.

la double solution apparait à première vue des plus inopportuns. La TQC n'est assurément pas exempte des difficultés rappelées par de Broglie. La possibilité de son application au domaine nucléaire est encore loin d'être acquise. De plus, l'étrangeté de la procédure de la renormalisation afin de remédier au problème de divergence parait suspecte malgré son fort pouvoir prédictif, y compris aux yeux de ses principaux contributeurs comme Feynman et Dirac. Cependant, la double solution est en l'état bien loin de se proposer comme une solution alternative viable à la TQC. Le dessein de de Broglie se situe en réalité à un niveau plus fondamental. Parmi les raisons motivant son choix, il évoque la communication de Bohm transmise à la fin de l'été 1951 qui permet à la fois de lever l'objection de Pauli et de contrer le théorème de von Neumann. Ce sont pour lui des arguments sérieux pour reconsidérer le problème de l'indéterminisme quantique. Cependant, c'est surtout le rapprochement opéré par Vigier entre la théorie de la double solution et les théories unitaires relativistes qui permet réellement de gagner son adhésion. De Broglie affectionne les modèles généraux et spéculatifs. La nouvelle orientation de la double solution proposée par Vigier, en collaboration avec Schatzman et Régnier, va tout à fait dans ce sens. La possibilité d'unifier quanta et gravitation ouvre la voie pour un nouveau programme de recherche doté d'un fort pouvoir heuristique. C'est d'ailleurs la principale limite qu'il mentionne dans la TQC, celui de n'être qu'une théorie qui se restreint à la version restreinte de la relativité :

> Assurément, la Mécanique ondulatoire a tenu compte des conceptions de la relativité restreinte et a cherché à les englober : la théorie de l'Électron à spin de Dirac et plus récemment les belles théories de Tomonaga, Schwinger, Feynman et Dyson ont utilisé les idées de la covariance relativiste. Mais c'est toujours de relativité restreinte qu'il s'agit. Or, on sait que la relativité restreinte ne se suffit pas à elle même et qu'il est nécessaire de la généraliser comme l'avait fait Einstein en 1916. Il est dès lors paradoxal que les deux grandes théories de la physique contemporaine, la Relativité générale et celle des Quanta, soient aujourd'hui sans aucun contact et s'ignorent mutuellement. Il faudra bien qu'un jour on parvienne à en faire une synthèse.[70]

De Broglie ne cache certes pas sous le tapis les obstacles actuels de la théorie dont il n'est pas certain qu'ils soient un jour résolubles. Néanmoins, mis dans la balance, ceux-ci sont contrebalancés par les potentialités de réorienter la physique théorique sur de nouvelles bases :

> Monsieur Vigier poursuit avec ardeur des tentatives pour préciser cette analogie en cherchant à introduire les fonctions d'onde u dans la définition de la métrique de l'espace temps. Bien que ces tentatives ne soient peut-être pas encore pleinement convaincantes, il est certain que la voie dans laquelle

70. de Broglie, « La physique quantique restera-t-elle indéterministe ?», 307.

> il s'est engagé est très intéressante car elle pourrait conduire à une unification des idées de la Relativité générale et de la Mécanique ondulatoire. [...] L'avenir dira si cette grandiose synthèse de la Relativité et des Quanta est vraiment possible.[71]

Dans la préface de l'édition commerciale de la thèse de Vigier soutenue en décembre 1954, de Broglie exprime ce même engouement envers le programme initié par son jeune assistant :

> Tant que l'ensemble des difficultés n'aura pas été levé, on ne sera pas sûr qu'elles sont surmontables et l'on ne pourra pas affirmer que l'interprétation causale et objective de la Mécanique ondulatoire par les conceptions de la double solution doit remplacer l'interprétation probabiliste actuelle. Si cependant la première devait un jour finir par l'emporter sur la seconde, M. Jean-Pierre Vigier devrait alors être considéré comme ayant puissamment contribué par ses recherches à cette évolution nouvelle et assez imprévue de la Physique théorique.[72]

À la fin de son exposé au Centre de synthèse, de Broglie se livre aussi à une critique de l'évolution récente de la mécanique quantique et particulièrement de la théorie quantique des champs. Bien qu'il lui reconnaisse ses succès, il met en garde contre cette fuite en avant vers une abstraction toujours plus grande qui l'éloigne chaque jour encore plus des représentations classiques :

> L'histoire des sciences montre que les progrès de la Science ont été constamment entravés par l'influence tyrannique de certaines conceptions que l'on avait fini par considérer comme des dogmes. Pour cette raison, il convient de soumettre périodiquement à un examen très approfondi les principes que l'on a fini par admettre sans plus les discuter. L'interprétation purement probabiliste de la Mécanique ondulatoire a certainement depuis un quart de siècle rendu des services aux physiciens. [...] Mais aujourd'hui le pouvoir explicatif de la Mécanique ondulatoire, telle qu'elle est enseignée, paraît en grande partie épuisé. Tout le monde le reconnaît et les partisans de l'interprétation probabiliste eux-mêmes cherchent, sans beaucoup de succès, semble-t-il, à introduire des conceptions nouvelles encore plus abstraites et plus éloignées des images classiques. [...] Sans nier l'intérêt de ces tentatives, on peut se demander si ce n'est pas plutôt vers un retour à la clarté des représentations spatio-temporelles qu'il faudrait s'orienter. En tout cas, il est certainement utile de reprendre le problème très difficile de l'interprétation de la Mécanique ondulatoire afin de voir si celle qui est actuellement orthodoxe est vraiment la seule que l'on puisse adopter.[73]

71. Ibid., 308.
72. Jean-Pierre Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta* (Paris : Gauthier-Villars, 1956), XI.
73. de Broglie, « La physique quantique restera-t-elle indéterministe ?», 310-311.

Ainsi, le retour de de Broglie à ses anciennes conceptions est rétrospectivement cohérent pour peu qu'il soit mis en contexte. D'une part, de Broglie s'est à plusieurs reprises illustré par ses choix théoriques situés en dehors des courants dominants, y compris pendant sa période bohrienne ; en témoignent la théorie des particules à spin et la méthode de fusion qui est son principal programme de recherche de 1932 à 1945. Pour relativiser cette rupture théorique, il peut être utile d'effectuer un parallèle avec le volte-face de Bohm de 1951 : bien qu'il y ait dans les deux cas un important changement de point de vue théorique, il demeure une constance épistémologique. Chez Bohm il s'agit du marxisme et de la dialectique matérialiste, chez de Broglie il s'agit d'un réalisme qui impose de maintenir des représentations concrètes du monde.

2.3.2 | Un ennemi de classe, mais allié de circonstance

Le groupe de jeunes physiciens communistes est tiraillé quant à l'attitude à adopter face au virage opéré par de Broglie. D'un côté, de Broglie est, sur le plan politique et philosophique, un adversaire. De l'autre, malgré qu'il ne soit plus un élément moteur du développement de la physique théorique en France après la guerre, il est institutionnellement incontournable. Lors d'un séminaire organisé au printemps à l'IHP, où sont invités Francis Perrin, Louis Leprince-Ringuet, Edmond Bauer ainsi que les physiciens étrangers Theodore von Kármán et Wolfgang Pauli, et auquel Schatzman et Vigier assistent, de Broglie commence déjà à montrer des signes de doute. Schatzman l'interprète comme une posture opportuniste :

> Le plus remarquable fut le discours de de Broglie. Il peut être résumé de la façon suivante : si la théorie de Bohm est correcte, je l'avais dit avant lui, si la théorie de Bohm est fausse, je l'avais également dit.[74]

Il est difficile, en l'absence de sources complémentaires, de déterminer quel crédit apporter aux propos de Schatzman. Nous disposons seulement d'un courrier daté de décembre 1951 à Léon Rosenfeld de Jean-Louis Destouches, ancien élève de de Broglie qui officie également à l'IHP, abondant dans le sens d'un changement de position en partie guidé par des considérations stratégiques :

> M. Louis de Broglie, dans sa Note aux Comptes Rendus de Septembre dernier (C.R.P.641) a d'abord réagi vigoureusement contre M. Bohm qui ne citait pas assez ses travaux anciens et a indiqué toutes les difficultés que comporte la théorie de l'onde pilote. Bohm ayant répondu qu'il le citerait dans la publication de son travail et sous l'influence de M. Vigier et de Mme

74. Évry Schatzman, Évry Schatzman à David Bohm, 15 mai 1952, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

> Tonnelat, M. Louis de Broglie a pris une attitude beaucoup moins catégorique dans son commentaire à la Note de M. Vigier.[75]

En revanche, cet épisode démontre clairement le climat de méfiance qui règne entre les communistes et de Broglie. Bohm, comme expliqué précédemment, a ses raisons personnelles pour maintenir de Broglie à l'écart et réduire son implication au minimum. Par la suite, Bohm va jusqu'à demander à Schatzman s'il peut éviter, dans la mesure du possible, de lui communiquer certains articles en cours de rédaction, par crainte que de Broglie ne publie, grâce à sa position à l'Académie des Sciences, ses propres résultats avant lui :

> Il serait mieux de ne pas montrer cet article à de Broglie avant quelques mois, comme il a la déplaisante habitude de voler les idées des autres sans les créditer. Il est capable de publier en 2 semaines, alors que *Phys Rev* prend 6 mois. Mais utilise ton jugement personnel là dessus. Peut-être que ça stabilisera le travail de Vigier et Régnier si de Broglie se sent plus optimiste au sujet de la théorie. Si c'est le cas, alors, par tous les moyens, montrez-le-lui.[76]

Bohm fait probablement allusion ici à une sombre histoire de plagiat impliquant de Broglie, qui a recopié, sans les citer, des passages entiers du livre de cours de Max Born de 1933 *Optik*[77] dans son propre manuel *Optique électronique et corpusculaire*.[78] Lorsque Born s'en rend compte, il écrit une lettre à la revue *Nature* avant que celle-ci ne publie une recension du livre de de Broglie afin de les en informer, d'autant plus que Born est justement en train de le traduire en vue d'en publier une version anglaise.[79] Ce manuel est désormais un classique de l'optique, réédité à maintes reprises. Comme Born l'explique dans sa lettre, cet incident est d'autant plus dommageable que la traduction en cours est originellement motivée par la récupération des droits d'auteurs de l'ouvrage confisqués en 1943 par l'U.S Alien Property Custodian, comme ce fut le cas

75. Jean-Louis Destouches, Jean-Louis Destouches à Léon Rosenfeld, 19 décembre 1951, Léon Rosenfeld's papers, Niels Bohr Archives, University of Copenhagen, Copenhague.

76. David Bohm, David Bohm à Évry Schatzman, 16 juin 1952, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris, La lettre est datée du 16 juin 1951, mais il s'agit d'une erreur. L'en-tête du courrier est celui de l'université de São Paulo et l'article en question, à propos des probabilités dans l'interprétation causale, est très vraisemblablement ; David Bohm, « Proof That Probability Density Approaches $|\Psi|^2$ in Causal Interpretation of the Quantum Theory », *Phys. Rev.* 89, n° 2 (1953) : 458-466.

77. Max Born, *Optik : Ein Lehrbuch der elektromagnetische Lichttheorie* (Berlin : Springer-Verlag, 1933).

78. Louis de Broglie, *Optique electronique et corpusculaire* (Paris : Librairie scientifique Hermann & Cie, 1950).

79. Les passages relevés par Born sont les pages 150-159, 159-164 et 169 du livre de de Broglie qui correspondent respectivement aux pages 68-77, 85-90 et 92 de son livre. Nous tenons à remercier Jean-Philippe Martinez de nous avoir aimablement communiqué cette correspondance. Max Born, Max Born à Jack F. Brimble, 14 mars 1951, Max Born Papers - 1/3/2/21, Churchill Archives Centre, Churchill College, Cambridge, UK.

de l'ensemble des brevets, droits d'auteur (*copyrights*) et droits de marques allemands pendant les Première et Seconde Guerres mondiales au titre de réparation.[80]

Du côté français, l'hostilité est alimentée tant par la figure du physicien et son rôle institutionnel que par d'évidentes raisons idéologiques :

> Son absence de sens pratique a de lourdes conséquences. Il a été très influencé par Destouches. Il n'a jamais essayé de construire une école de théoriciens. Il n'a jamais eu l'audace de faire un institut de physique théorique. Tout s'est juste présenté à lui. Mais, aussi naïf qu'il puisse être, il a une vraie conscience de classe. Son attitude envers le matérialisme et l'idéalisme est très influencée par sa conscience de classe.[81]

La conscience de classe est une allusion aux origines aristocratiques de de Broglie et, peut-être, à sa nomination au Conseil national du gouvernement de Vichy pendant la collaboration. Bien qu'il ait refusé d'y siéger et que la commission d'épuration de la Faculté de Paris l'ait blanchi après la guerre, sa réputation n'en est pas moins ternie.[82] Schatzman pointe par ailleurs un reproche souvent adressé à de Broglie : son manque d'entrain dans la modernisation, pourtant urgente, de l'enseignement de la physique en France après la guerre alors que son rôle institutionnel est prééminent.[83] La situation est cocasse, puisque du point de vue de Schatzman, de Broglie est sous l'influence de Destouches, alors que ce dernier regrette que de Broglie soit sous l'emprise de Vigier. De Broglie est décidément une personnalité difficilement sondable. Cependant, alors que Bohm aimerait, dans la mesure du possible, le maintenir à l'écart, les communistes ont des intérêts immédiats divergents et doivent choisir la voie de ce qui s'apparente être un compromis de classe :

> De Broglie est très puissant. Obtenir des subventions ou une aide financière dépend essentiellement de sa bonne volonté. Malheureusement, il est très susceptible, sans sens pratique, et nous avons besoin de son aide pour publier des articles en physique théorique. D'un autre côté, nous ne pouvons pas trop lui faire confiance. L'un de ses articles est en partie fait à partir d'idées exprimées par Vigier en privé.[84]

80. Heinz Götze, *Springer-Verlag : History of a Scientific Publishing House : Part 2 : 1945–1992 Rebuilding – Opening Frontiers – Securing the Future* (Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 1996), 100 ; Entre autres, la première version du célèbre ouvrage de John von Neumann sur les fondements de la mécanique quantique publiée sur le sol américain en 1943 l'est par Dover Publications à partir des droits spoliés par l'U.S. Alien Property Custodian. Reinhard Siegmund-Schultze, « The Emancipation of Mathematical Research Publishing in the United States from German Dominance (1878–1945) », *Historia Mathematica* 24 (1997) : 135-166 ; La première édition de la traduction anglaise de l'ouvrage de Born voit le jour en 1959. Max Born et Emil Wolf, *Principles of Optics*, Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light (Londres : Pergamon Press, 1959).

81. Schatzman, Évry Schatzman à David Bohm.

82. Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960) », 248.

83. Ibid., 204-209.

84. Schatzman, Évry Schatzman à David Bohm.

Pour des raisons tactiques, les jeunes physiciens ont besoin de de Broglie. Son siège à l'Académie des Sciences ouvre en effet une fenêtre pour publier rapidement dans les *CRAS* puisque les notes sont présentées, et donc publiées, selon l'appréciation des secrétaires perpétuels. De Broglie dispose également de crédits qui permettront de recevoir des personnalités étrangères et de financer différentes missions, comme celles de Vigier au Brésil et au Japon. Quant à de Broglie, une fois qu'il a réalisé qu'une théorie déterministe est viable, il ne doit pas rater le coche à cause de la querelle de priorité avec Bohm. Au demeurant, le fait que Vigier prenne parti pour la forme de la double solution lui permet de faire valoir la plus-value originelle de son approche par rapport à celle de Bohm, une manière de démontrer que, parmi les théories à variables cachées possibles, la sienne est la plus consistante. Ainsi, une improbable alliance nait entre les communistes et de Broglie une improbable alliance mutuellement bénéfique. Elle signe l'acte de naissance du « groupe IHP».

2.4 La constitution du « groupe IHP»

À partir de la fin 1952, seulement un an après les premiers échanges avec Bohm, Vigier et de Broglie, soutenus par Schatzman, s'attèlent à perfectionner le modèle causal de la mécanique quantique à l'IHP. Le cadre de travail est idéal pour ces physiciens en comparaison des autres laboratoires où se pratique la physique théorique. En effet, l'IHP est singulier dans le paysage scientifique français. C'est en premier lieu un institut de mathématiques qui accueille une chaire de physique théorique.

À l'opposé du mouvement général qui suit la tendance mondiale d'une physique quantique avant tout préoccupée par ses applications concrètes, la tradition d'une recherche physique abstraite et conceptuelle se maintient après la guerre à 'IHP. L'institut est, en quelque sorte, une oasis pour les physiciens qui ne s'intéressent qu'à la théorie pure, à la différence des autres lieux investis par les physiciens théoriciens après la guerre (le CEA à Saclay, les différents laboratoires à l'ENS, l'Institut du Radium, les laboratoires de chimie et de physique au Collège de France, la nouvelle université d'Orsay) qui collaborent systématiquement avec des expérimentateurs, dans une approche résolument plus pragmatique de la physique « à l'américaine».

Dans leur tour d'ivoire, les physiciens de l'IHP disposent d'une grande liberté quant au choix de leurs thématiques de recherche, qui ne suivent pas nécessairement les courants dominants. Les recherches de Tonnelat sur les théories unitaires relativistes, auxquelles Vigier collabore, en sont la parfaite illustration. Jusqu'aux années 1960 et le développement de la cosmologie, la relativité générale est délaissée par les théoriciens pour n'être étudiée que par une petite poignée de physiciens éparpillés dans le monde

et en dehors des grandes places fortes universitaires.[85] On pourrait compléter ce tableau en mentionnant les travaux en épistémologie et en logique de la physique de Paulette Février et de Jean-Louis Destouches qui se tiennent éloignés du champ de l'expérimentation bien que s'inscrivant dans le cadre de l'ISMQ ; ou encore les investigations baroques d'Olivier Costa de Beauregard sur l'hypothèse de la causalité rétrograde et l'interprétation psychokinésiste de la mesure quantique. Bien entendu, il serait exagéré de qualifier toute la production en provenance de l'IHP comme étant en dehors des canons. les travaux d'Alexandru Proca, par exemple, suivent le courant dominant de la physique théorique. En outre, son séminaire qu'il organise de 1946 jusqu'à sa mort en 1955, quelque peu en concurrence avec celui de de Broglie, est un vecteur de diffusion des travaux de pointe en TQC qui a la particularité d'être particulièrement ouvert sur l'international.[86]

Il règne néanmoins à l'IHP un climat intellectuel propice à la spéculation physique et, selon Destouches, majoritairement hostile à l'indéterminisme en physique. Ceci explique, sinon un accueil favorable de la théorie de Bohm, au moins un intérêt des physiciens pour cette interprétation alternative à prétention réaliste. À ce propos, Destouches témoigne auprès de Rosenfeld de son sentiment d'isolement en étant désormais le dernier défenseur de la complémentarité bohrienne :

> Les jeunes gens ont accueilli avec enthousiasme le travail de Bohm qui correspond à toutes les tendances philosophiques qui les animent : réalisme thomiste, déterministe marxiste, rationalisme cartésien. Je suis donc maintenant à peu près le seul ici à soutenir encore l'interprétation quantique de Bohr.[87]

Les trois grands courants philosophiques mentionnés par Destouches correspondent, respectivement, à ceux de Broglie, Vigier et Tonnelat. Là encore, l'appréciation de la situation semble dépendre des sensibilités philosophiques de chacun. Dans un sens contraire, le jeune physicien Georges Lochak, qui entre à l'IHP en 1954 pour rejoindre Vigier et de Broglie, témoigne du parfum de marginalité entourant de Broglie et ses fidèles. La courtoisie n'est que de façade et les jeunes doctorants ne sont pas avares en quolibets envers de Broglie dans les couloirs de l'IHP, eux qui souhaitent travailler sur les récentes avancées de la théorie quantique provenant des États-Unis, et certainement pas sur une vieille théorie qu'ils pensent condamnée à l'échec. Les idées de de Broglie sont même minoritaires au sein de son propre séminaire, ouvert à tous.[88] Pour abonder dans le sens du témoignage de Lochak, parmi les anciens élèves de de

85. Jean Eisenstaedt, *Eisntein et la relativité générale* (Paris : CNRS Éditions, 2013), 387-395 et 511-514.
86. Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960) », 222-224.
87. Destouches, Jean-Louis Destouches à Léon Rosenfeld.
88. Lochak, *Louis de Broglie*, 208.

Broglie, aucun ne l'a réellement suivi. Destouches surinterprète sans doute la position de Tonnelat. Les rares textes où elle partage son opinion sur la mécanique quantique, comme ces mots qui concluent l'article pour l'ouvrage dédié aux 60 ans de de Broglie de 1952, expriment plutôt une certaine retenue :

> Il ne semble pas à l'heure actuelle, en dépit de l'ingénieuse tentative de Bohm, que les obstacles les plus sérieux soient aplanis. La solution la plus sage parait donc de s'en tenir à la description indéterministe et positiviste des théories quantiques sans se dissimuler qu'elle est loin d'aboutir à des conclusions entièrement satisfaisantes même dans un exemple aussi simple que celui des trous d'Young.
>
> Le problème de la description complète d'une réalité physique objective n'est donc pas résolu. Peut-être est-il effectivement insoluble. Malgré cela, il serait vain de soutenir avec quelque dogmatisme que la position ne se pose pas. Tout au plus peut-on penser que ce problème correspond à une exigence que les uns jugeront vaine et les autres incoercibles. Newton fut peut-être le moins satisfait des attractionnaires : laissons à Louis de Broglie, positiviste de fait, mais cartésien de cœur, l'espoir de contempler suivant d'autres perspectives la reconstitution d'une réalité physique que son analyse ingénieuse a contribué à dissocier.[89]

Tonnelat a manifestement de la sympathie philosophique pour l'approche de de Broglie, elle est une réaliste convaincue en ce qui concerne la relativité. Cependant, elle demeure assez prudente en ce qui concerne l'issue du débat sur les quanta qui n'est pas sa spécialité. Bien qu'en toute probabilité elle souhaiterait voir son ancien maitre réussir dans cette voie, elle se garde bien de juger si une description objective du monde peut être maintenue en physique quantique.

Par contre, il est remarquable que Destouches, même s'il est un opposant philosophique à l'ICMQ en se déclarant lui-même bohrien, reste ouvert à la discussion. Après le changement de position opéré par son ancien professeur, il maintient un dialogue constant avec celui-ci. Il contribue même, à sa manière, pendant les années 1950, au programme en démontrant la consistance logique de la double solution à partir de ses propres outils méta théoriques ainsi qu'en développant une théorie qui réemploie l'onde u à singularité de de Broglie dans le cadre d'équations non linéaires, mais en donnant toutefois à cette onde une interprétation fonctionnelle et non réaliste.[90] Cette attitude tranche nettement avec celle de nombreux orthodoxes qui considère l'ICMQ avec dédain.

Pour ces raisons, l'IHP est indubitablement en France le lieu d'accueil le plus favorable pour le développement d'une interprétation alternative à la mécanique quan-

89. Marie-Antoinette Tonnelat, « La notion de réalité physique et l'œuvre de Louis de Broglie », in George, *Louis de Broglie. Physicien et penseur*, 145-152.

90. Michel Bitbol, « Jean-Louis Destouches : théories de la prévision et individualité », *Philosophia Scientiæ* 5 (2001) : 6.

tique. L'IHP devient *de facto* le quartier général mondial de l'ICMQ de la théorie des quanta. Vigier et de Broglie vont être progressivement rejoints par d'autres physiciens à partir de 1954. La particularité de ces nouvelles recrues est d'être sinon adhérentes au Parti, au moins proches de la gauche marxiste. Ceci n'est pas étonnant puisque Vigier s'occupe des recrutements. Il s'agit de Francis Fer, ingénieur aux Mines, Gérard Petiau, George Lochak, Francis Halbwachs, Pierre Hillion et de quelques physiciens non français tels le portugais João Andrade e Silva et le premier polytechnicien cambodgien Mumm Thiounn qui quittera d'ailleurs la France pour rejoindre les Khmers rouges.[91] Ainsi, Bohm trouve à Paris de sérieux appuis, contrebalançant la « conspiration du silence» dont il se sent victime à Princeton. Malgré certaines tensions et suspicions, l'existence de ce groupe doit beaucoup au soutien de de Broglie. Celui-ci est en effet un appui scientifique, mais surtout institutionnel, de taille. En tant que figure tutélaire, de Broglie offre un espace pour que de jeunes physiciens puissent consacrer leur temps au développement d'un programme de recherche dont la légitimité est vivement contestée par le reste de la communauté des physiciens quantiques. C'est ainsi qu'il va encadrer un certain nombre de thèses de doctorat dont les sujets sont en rapport avec la théorie causale. Outre celle de Vigier,[92] la thèse de Fer se concentre pour sa part sur les mathématiques de la double solution,[93] celle de Halbwachs sur la représentation hydrodynamique de la mécanique quantique[94] et celle d'Andrade e Silva sur la représentation des systèmes à N corps dans l'espace réel.[95] De plus, de Broglie ouvre à ces physiciens les portes du séminaire qu'il organise à l'IHP et leur offre la possibilité de publier facilement dans les *CRAS*. Pour de jeunes chercheurs, c'est une visibilité inespérée qu'ils auraient difficilement pu acquérir seuls en travaillant sur une telle thématique. Par contre, si de Broglie met sa notoriété et sa position institutionnelle au service du groupe, Vigier en est la véritable locomotive et s'impose naturellement comme le leader. Lochak lui reconnait un air « séducteur et inquiétant».[96] Halbwachs le considère comme un « ami et un maître».[97] Son caractère bien trempé, son extrême confiance

91. Henri Locard, *Pourquoi les Khmers rouges* (Paris : Vendémiaire, 2013).
92. Jean-Pierre Vigier, «Recherches sur l'interprétation causale de la théorie des quanta» (thèse de doct., Faculté des Sciences de Paris, 1954).
93. Francis Fer, «Les solutions singulières des équations d'onde et la théorie de la double solution» (thèse de doct., Faculté des Sciences de Paris, 1956).
94. Francis Halbwachs, «Recherches sur la mécanique du corpuscule tournant relativiste et l'hydrodynamique relativiste des fluides dotés d'une densité de moment angulaire interne» (thèse de doct., Faculté des Sciences de Paris, 1958) ; La thèse est également éditée chez Gauthier-Villars : Francis Halbwachs, *Théorie relativiste des fluides à Spin* (Paris : Gauthier-Villars, 1960).
95. João Andrade E Silva, «La théorie des systèmes de particules dans l'interprétation causale de la Mécanique ondulatoire» (thèse de doct., Faculté des Sciences de Paris, 1960).
96. Lochak, *Louis de Broglie*, 214–217.
97. Halbwachs, « Recherches sur la mécanique du corpuscule tournant relativiste et l'hydrodynamique relativiste des fluides dotés d'une densité de moment angulaire interne», 4.

en ses idées et son indéfectible optimisme, devenu proverbial jusqu'au Brésil,[98] créent une certaine fascination chez ces jeunes physiciens ainsi que chez de Broglie lui-même.

Le ralliement de de Broglie à l'ICMQ et ce nouvel entourage ne manquent pas de surprendre les connaissances du prix Nobel français. Peu de temps après le séminaire d'octobre 1952 au centre de synthèse, Pauli, sur le ton caustique qui lui est propre, commente auprès du physicien suisse Markus Fierz cette alliance bigarrée entre le catholique et les communistes. Ce sont, d'après Pauli, deux doctrines qui dépendent du déterminisme afin de consolider leurs croyances eschatologiques : la première dans les cieux futurs, la deuxième dans le paradis sur Terre.[99] Cette explication possède un fond de vérité. La coopération entre Vigier, de Broglie et les autres jeunes physiciens communistes est évidemment possible parce que leurs philosophies respectives partagent des points communs, en particulier un réalisme, ou matérialisme dans la terminologie marxiste, selon lequel les théories physiques et leurs équations ont une correspondance avec la réalité. Par contre, cette entente philosophique ne déborde pas sur le terrain politique. Si certains à différentes occasions ont perçu de l'ambigüité dans l'attitude de de Broglie, tout le monde s'accorde sur le fait qu'il n'est pas un cryptomarxiste et qu'il se situe de l'autre côté de l'échiquier politique. En réalité, tous ceux qui ont côtoyé l'homme témoignent d'une nette distanciation vis-à-vis de la politique, sujet qu'il n'effleure jamais en présence de ses collaborateurs.[100] Il est évidemment difficilement imaginable que les communistes entre eux n'abordent jamais le sujet en l'absence du chef. Ceux-ci mènent d'ailleurs la bataille sur plusieurs fronts puisqu'ils doivent aussi convaincre leurs camarades au sein du Parti de la pertinence de l'ICMQ comme véritable théorie-interprétation marxiste des quanta. Toutefois, la condition tacite à la bonne coopération entre tous les membres est que la politique ne franchisse pas le seuil d'entrée de l'IHP. En présence du maitre, les discussions sont circonscrites à la physique et à la philosophie. Le strict respect de cette règle est le fondement du compromis de classe des communistes avec de Broglie.

98. David Bohm, David Bohm à Évry Schatzman, 12 octobre 1953, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

99. « Daß Katholiken und Kommunisten sich in Frankreich gegen die Komplementarätt (was "Indeterminismus" einschlielßt) geeinigt haben, wundert mich nicht. Beide sind nämlich psychologisch an eine eschatologische Erwartung gebunden, ob diese nun im Diesseits oder im Jenseits liegt ist relativ unwichtig.» Wolfgang Pauli à Markus Fierz, in *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. Band IV, Teil I : 1950–1952*, 499-502 ; Cité dans : Olival Freire Jr., «Science and exile : David Bohm, the Cold War, and a new interpretation of quantum mechanics», *Hist. Stud. Nat. Sci.* 36 (2005) : 6.

100. Vigier, entretien avec Michel Pinault ; Lochak, *Louis de Broglie*, 215.

Chapitre 3

Les premiers travaux de Jean-Pierre Vigier sur l'interprétation causale

Dès l'automne 1952, après que de Broglie ait décidé de reconsidérer positivement ses anciens travaux, celui-ci et Vigier, aidés ponctuellement par Schatzman, s'emploient à l'amélioration de l'ICMQ afin d'en consolider les fondations. Leurs principaux axes de réflexion s'articulent autour de la théorie de la double solution, laissée en plan par de Broglie en 1927 et pour Vigier de l'approfondissement du lien entre la double solution et la relativité générale. De Broglie valide le sujet de thèse de Vigier[1] sur ce sujet qu'il soutient le 11 décembre 1954 à la Sorbonne, devant un jury composé de Georges Darmois, André Lichnerowicz et Marie-Antoinette Tonnelat.[2] La composition de ce jury souligne encore une fois l'ancrage relativiste que Vigier souhaite donner à l'ICMQ.

Sa thèse se présente comme un état de l'art des recherches sur l'ICMQ depuis 1927 jusqu'à 1954, enrichie par ses apports personnels. Pour cette raison, notre étude s'appuie essentiellement sur cette source primaire, complétée par quelques notes aux *CRAS* publiées durant la même période. Le document s'étend sur 190 pages qui se divisent en six chapitres. Le premier expose la théorie de l'onde pilote à laquelle Vigier rattache la théorie des variables cachées de Bohm. Le second traite de la forme avancée de l'onde pilote, la théorie de la double solution qui permet d'introduire l'aspect corpusculaire des particules. Le troisième présente les tentatives de l'auteur de raccorder la théorie causale avec la relativité générale à partir de la double solution. Le quatrième

1. Schatzman, Évry Schatzman à David Bohm.
2. Vigier, « Recherches sur l'interprétation causale de la théorie des quanta » ; Au cours de ce chapitre, nous citons la version éditée de la thèse qui est strictement identique, y compris dans sa pagination, à celle soutenue à la Faculté des sciences de Paris. La seule différence consiste en une préface de Louis de Broglie que ne contient pas le texte originel. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*.

chapitre aborde les ensembles statistiques de particules. Enfin, les deux derniers chapitres portent sur les particules en interaction et la théorie de la mesure, le dernier étant principalement une reprise du second article de Bohm de 1952.

Notre étude se focalise essentiellement sur les chapitres 1, 2, 3 et 5 car ils correspondent aux tout premiers travaux de Vigier réalisés à l'IHP. Ce sont ceux qui vont dans le sens de son programme de recherche originel d'un développement de la théorie de la double solution et d'une tentative d'unification avec la relativité générale. Le quatrième chapitre correspond pour sa part aux recherches de Bohm et Vigier lors du séjour de ce dernier à l'USP en 1953 et qui aboutissent sur une publication dans *Physical Review*.[3] Comme nous le montrerons au chapitre 5, celles-ci marquent un tournant théorique de ICMQ en cela que le formalisme de la double solution est mis de côté au profit de la représentation hydrodynamique sous l'impulsion des travaux de Takehiko Takabayasi (voir le chapitre 4), qui devient alors la représentation privilégiée de l'ICMQ par les physiciens.

En conclusion de ce chapitre, nous mettrons en lumière par cette analyse rapprochée le style scientifique de Vigier afin d'identifier sa contribution personnelle à l'ICMQ. Dans une approche comparative, nous verrons sur quels points essentiels la physique telle que pratiquée par Vigier diffère de celle de Bohm pour davantage se rapprocher de celle de son maitre de Broglie.

Enfin, nous mentionnons brièvement les contributions des collaborateurs de Vigier et de de Broglie qui se rattachent directement aux travaux présentés dans ce chapitre. Ce sont principalement les apports de Gérard Petiau et de Francis Fer qui viennent préciser les aspects mathématiques, en particulier les formes des solutions à singularité. Pour l'essentiel, ces travaux se matérialisent en une série de notes aux *CRAS* et pour Fer, de sa thèse de doctorat dirigée par de Broglie.[4] En raison de leur nature mathématique (la thèse de Fer relève davantage de l'analyse mathématique que de la physique), nous avons choisi de ne pas les traiter de manière systématique.

3.1 L'idéal classique et relativiste

Les premières lignes de la thèse de Vigier montrent d'emblée qu'il place haut les ambitions de l'ICMQ. Dans un style emprunté à son maitre de Broglie, l'introduction débute par une brève histoire de sa discipline, de la physique classique aux deux grandes révolutions qui ont marqué la première moitié du XXe siècle :

> Le développement de la théorie de la Relativité Générale et la découverte des propriétés ondulatoires des micro-objets ont bouleversé les idées

3. David Bohm et Jean-Pierre Vigier, «Model of the Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations», *Phys. Rev.* 96, n° 1 (1954) : 208-216.
4. Fer, « Les solutions singulières des équations d'onde et la théorie de la double solution ».

> classiques sur la nature du monde physique. Des concepts qui paraissaient indestructibles, tel le caractère déterministe des phénomènes, ont été remis en cause et les controverses ainsi ouvertes, il y a plus de trente ans, ne sont pas closes aujourd'hui. On peut même affirmer sans paradoxe que la crise engendrée par les nouvelles théories est loin d'être résolue, comme en témoignent les difficultés auxquelles se heurte actuellement la théorie des quanta au niveaux des phénomènes nucléaires.
>
> Les travaux exposés dans cet ouvrage sont étroitement rattachés aux problèmes soulevés au cours des controverses précédentes.[5]

Vigier situe ainsi l'ICMQ dans la continuité des théories qui ont révolutionné la physique au cours de l'Histoire : la mécanique classique, l'électromagnétisme, la relativité généralisée et la théorie des quanta. En exergue de la thèse, une citation d'Einstein, extraite de l'article écrit en l'honneur de de Broglie dans laquelle il rappelle son attachement à « l'état réel d'un système physique qui existe objectivement, indépendamment de toute observation ou mesure et qui peut en principe se décrire par les moyens d'expression de la physique »,[6], est reproduite, ce qui constitue une manière pour Vigier de revendiquer son héritage einsteinien. Dans la version publiée de la thèse, Vigier rend même hommage au « physicien matérialiste et déterministe » décédé l'année précédente.

L'ICMQ dépasse donc pour Vigier le statut de simple interprétation alternative de la mécanique quantique. Elle constitue le point de départ d'une nouvelle théorie fondamentale. Ce besoin d'un renouveau théorique est exigé par la « la crise engendrée par les nouvelles théories [qui] est loin d'être résolue. » Vigier précise les contours de cette crise de la physique dans un écrit annexe, publié sous forme de chapitre de l'ouvrage *La physique quantique restera-t-elle indéterministe ?* :

> Toutefois, après une période d'éclatante réussite, la Mécanique quantique est entrée dans une période de crise. Ses succès dans le domaine atomique ont été suivis d'échecs sérieux dans le domaine nucléaire. On n'a pu fournir jusqu'ici, en particulier, de théorie satisfaisante des champs mésiques découverts expérimentalement ces dernières années. De plus, les calculs d'énergie propre des particules conduisent toujours à des énergies propres infinies, ce qui est physiquement inadmissible. Il semble bien que le formalisme linéaire de la théorie, conséquence de l'interprétation statistique, et le caractère ponctuel attribué aux particules soient à la base de ces difficultés.
>
> C'est pourquoi, comme l'a souligné M. de Broglie, il semble légitime de remettre en cause les fondements mêmes du modèle quantique.[7]

5. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 1.
6. Albert Einstein, « Remarques préliminaires sur les concepts fondamentaux », in George, *Louis de Broglie. Physicien et penseur*, 5-15.
7. Vigier, « Physique relativiste et physique quantique », 98.

Vigier cible correctement les deux faiblesses majeures de la théorie quantique : l'apparition en électrodynamique quantique (QED) des valeurs infinies de la masse, de la charge, et de la polarisation du vide à certaines échelles et l'inapplicabilité des principes de la TQC au domaine intranucléaire. Le terme de crise n'est pas exagéré, surtout pour ce qui concerne la physique du noyau. Vigier exprime ici une opinion somme toute assez consensuelle sur l'état de la physique théorique de son temps que l'historien et acteur de l'époque Abraham Pais qualifie d'ère de frustrations.[8] Ce qui est cependant moins consensuel, ce sont les causes extra théoriques à l'origine de cette crise invoquées par Vigier : les renoncements simultanés d'une description objective et déterministe de la réalité physique. Lorsque nous qualifions ces causes d'extra théoriques, nous portons un jugement de valeur. Elles ne sont évidemment pas considérées comme telles par Vigier. Nous signifions par là que ce ne sont pas des concepts indispensables pour proposer une théorie de la mécanique quantique logiquement cohérente, au contraire, par exemple, des relations de Heisenberg qui doivent figurer, d'une manière ou d'une autre, dans toute proposition de formulation de la mécanique quantique.

Afin de mieux comprendre l'argument de Vigier, nous allons revenir sur ce fameux problème des infinis et voir la réponse préconisée par Vigier. Pour l'instant, nous laissons de côté cette crise de la physique du noyau, nous y reviendrons en détail au chapitre 7.

3.1.1 La crise de la physique quantique comme une conséquence de ses orientations épistémologiques

Le problème des infinis est intimement lié à la ponctualité des particules. Bien que généralement associé à l'électrodynamique quantique relativiste, il est soulevé pour la première fois par Kramers dans la seconde moitié des années 1930 alors qu'il tente d'appliquer les règles de quantification de Bohr à la théorie électromagnétique de Lorentz.[9] Dans la théorie de Lorentz, l'électron est assimilé à une distribution sphérique de charges égales. Lorentz calcule le mouvement de l'électron se déplaçant dans l'éther, siège des interactions électromagnétiques. Il applique les règles empruntées à l'hydrodynamique pour calculer sa masse. En hydrodynamique, la masse totale n'est en effet pas seulement d'origine mécanique, mais contient en plus un terme qui dépend des propriétés du milieu et des conditions aux limites. La valeur mesurée expérimentalement est donc la somme $m = m_0 + m'$ de la masse « mécanique» et de la masse

8. Abraham Pais, *Inward Bound : Of Matter and Forces in the Physical World* (Oxford : Oxford University Press, 1986), 492–494.

9. Max Dresden, «Renormalization in historical perspective – The first stage : From Lorentz to Landau (and beyond)», in *Renormalization*, sous la dir. de Laurie M. Brown (New York City, NY : Springer-Verlag, 1993), 35.

« hydrodynamique », sans qu'il soit possible de mesurer les deux contributions séparément. Cette masse est, en langage moderne, la masse renormalisée. Dans le cas de l'électron, Lorentz donne au second terme une origine électronique, engendrée par l'action de l'éther sur l'électron. Celle-ci vaut, pour un électron de charge e et de rayon a, $m' = \frac{2}{3}\frac{e^2}{ac^2}$, résultat déjà établi par Thomson en 1881. En supposant, comme Lorentz, que la masse de l'électron est uniquement d'origine électronique ($m_0 = 0$), alors elle se réduit en sa masse m_{exp} mesurée expérimentalement. Lorentz en déduit le rayon classique de l'électron, qui vaut $r_0 = \frac{2}{3}\frac{e^2}{m_{exp}c^2} \simeq 2,82 \cdot 10^{-13} cm$.[10] Le modèle de l'électron de Lorentz n'est pas exempt de difficultés théoriques, en premier lieu sa stabilité. Les charges se repoussent entre elles et une force inconnue, d'origine non électromagnétique, devrait, d'après Poincaré, garantir la cohésion interne de l'électron.[11] Le second problème rencontré par les modèles étendus des l'électron est qu'il n'existe pas de modèle relativiste satisfaisant puisque la notion de solide indéformable perd son sens.

En conséquence de l'impossibilité de produire une théorie stable de l'électron, par pragmatisme, la limite ponctuelle est alors communément admise comme une approximation acceptable pour les énergies considérées.[12] Cette approximation se justifie d'autant plus que le rayon de l'électron n'est pas une grandeur directement mesurable, argument supplémentaire pour le rendre nul dans la perspective du programme quantique dont l'un des fondements épistémologiques est d'évacuer de son formalisme toute quantité non observable.[13] Kramers, dans son programme de quantification de l'électrodynamique classique, avait là des raisons suffisantes pour abandonner l'électron étendu et prendre la limite ponctuelle. Mais, ce faisant, une difficulté surgit : la masse électromagnétique, proportionnelle à l'inverse du rayon, diverge linéairement.

Kramers compense cette divergence en reformulant l'équation lorentzienne de l'électron. Il remarque que l'expression de la force engendrée par l'action de l'électron sur son propre champ (l'éther dans la théorie de Lorentz), contient un terme proportionnel à la masse électronique m'.[14] Il combine ce terme avec la masse mécanique m_0 (également appelée *bare mass*, ou masse nue) et émet l'hypothèse que la masse expérimentale est en réalité l'addition des deux masses : $m_{exp} = m_0 + m'$. Il s'agit de la masse renormalisée : la divergence de m' est « masquée », car compensée par la masse mécanique m_0.[15] Ainsi, bien que prises isolément les expressions algébriques qui composent

10. Ibid., 42–44.

11. Tian Yu Cao, *Conceptual developments of 20th century field theories* (Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1997), 186.

12. À propos de la riche histoire des différentes stratégies des physiciens pour résoudre le problème de la *self-interaction* ou du problème de la radiation jusqu'à obtenir une équation de l'électron classique satisfaisante, voir : Mathias Frisch, *Inconsistency, Asymmetry, and Non-Locality : A Philosophical Investigation of Classical Electrodynamics* (Oxford : Oxford University Press, 2005).

13. Dresden, « Renormalization in historical perspective – The first stage », 48.

14. $F_{self} = -\frac{2}{3}\frac{e^2}{c^2}\ddot{x}\int\int \mathrm{d}\boldsymbol{x}\mathrm{d}\boldsymbol{x'}\frac{\rho(x)\rho(x')}{|x-x'|} - \frac{2}{3}\frac{e^2}{c^3}\dddot{x} + g\frac{a\,e^2}{c^4}\ddddot{x} + \ldots$

15. Dresden, « Renormalization in historical perspective – The first stage », 47–48.

la masse sont divergentes, la masse mesurée expérimentalement possède bien une valeur finie.

Kramers présente sa théorie à la conférence de Shelter Island en 1947. Celle-ci entre en résonance avec l'un des principaux sujets discutés lors de la conférence : la résolution théorique du décalage d'environ 1000 Mhz entre les niveaux $^2S_{1/2}$ et $^2P_{1/2}$ de l'atome d'hydrogène observé quelques mois auparavant par Lamb et son étudiant Retherford, mais non prédit par la théorie de Dirac de l'électron dans laquelle ces deux niveaux énergétiques sont égaux (dégénérés).

Hans Bethe, d'après une suggestion d'Oppenheimer, Schwinger et Weisskopf, s'emploie à calculer ce décalage en énergie comme résultant de la perturbation de l'électron par l'énergie quantique du vide. Ces perturbations font apparaitre des infinis. Il réutilise alors la renormalisation de Kramers et donne une première valeur approchée, non relativiste, de l'écart en énergie.[16] Ce sont French et Weisskopf qui effectuent le calcul relativiste et qui obtiennent ainsi la valeur correcte au printemps 1948.[17] L'explication du décalage de Lamb est incontestablement le plus beau succès de la TQC en cette fin des années 1940. La renormalisation devient une technique standard après les travaux de Schwinger, Feynman, Tomonaga et Dyson qui la systématisent. Cependant, la méthode divise les physiciens, y compris parmi ses créateurs. Les positivistes, comme Dyson, n'y voient certes aucun inconvénient puisque la théorie corrobore l'expérience avec une précision jusque-là jamais atteinte. D'autres, dont Feynman et Dirac, ne se satisfont toutefois pas de cette procédure qui semble sortie du chapeau et d'une rigueur mathématique douteuse.[18]

Cette insatisfaction face à l'électrodynamique quantique convainc Dirac de la nécessité d'une nouvelle théorie classique de l'électron qu'il faudra quantifier par la suite. La première étape de cette nouvelle théorie date de 1938, pour être reprise en 1951 quand Dirac ajoute l'hypothèse d'un éther.[19] Une suspicion envers la renormalisation que partagent évidemment les partisans de l'ICMQ. Selon des propos rapportés par Vigier, Bohm aurait affirmé, en plaisantant, « qu'il ne voit pas pourquoi on n'utiliserait pas une danse mystique si une telle danse fournissait des résultats corrects. »[20] Aux yeux de Vigier, elle apparait comme un bricolage théorique qui, certes, fonctionne empiriquement, mais sans correspondance avec le réel. À noter que Vigier exprimera par la suite un certain intérêt pour la théorie de Dirac, en particulier pour son concept

16. Schweber, *QED and the men who made it*, 189.
17. Ibid., 237–245.
18. Ibid., 460.
19. Helge Kragh, *Dirac : A Scientific Biography* (New York City, NY : Cambridge University Press, 1990), 189–204.
20. Jean-Pierre Vigier, « Quelques problèmes physiques posés par les thèses de Lénine », *La Pensée* 57 (1954) : 63.

d'éther covariant.[21] Ceci toutefois sans réciprocité puisque Dirac n'a, de son côté, jamais manifesté le moindre intérêt pour les théories à variables cachées.[22]

3.1.2 Le réalisme comme critère épistémologique

Selon Vigier, la contradiction fondamentale de la physique moderne est qu'elle devrait fournir une description de plus en plus adéquate du réel à mesure de ses progrès. Or, la mécanique quantique prend le chemin exactement inverse en s'éloignant toujours plus d'une description des phénomènes admissible d'un point de vue réaliste. Cette fuite en avant est symptomatique pour Vigier de l'épuisement de la théorie quantique qui appelle en conséquence au besoin d'un profond renouveau. Il considère que l'ISMQ, bien que conforme aux résultats expérimentaux, ne possède qu'un faible pouvoir explicatif en raison d'un discours qui s'en tient exclusivement à la description de résultats expérimentaux, sans se prononcer sur la réalité des phénomènes en dehors de ce contexte. Pour cette raison, il qualifie cette attitude de positiviste :

> Pour l'école de Copenhague, la notion classique de connaissance est dépourvue de sens. L'objet de la physique n'est pas de décrire le comportement réel des choses, mais uniquement de construire un symbolisme mathématique qui permette de rendre compte des résultats expérimentaux. Cette position, connue des philosophes sous le nom de positivisme s'exprime clairement dans la déclaration de Niels Bohr citant Heisenberg « ... les phénomènes (microscopiques) sont en quelque sorte engendrés par les observations répétées.»[23]

Pour Vigier, la science ne peut se restreindre au rôle descriptif que lui assigne l'ISMQ et elle doit avant tout proposer une explication des causes des phénomènes physiques. Ceci exige de refonder la théorie sur de nouvelles bases théoriques qui sont conceptuellement acceptables. Par là, il faut comprendre qui maintiennent une forme d'intuitivité permise par une représentation des phénomènes dans l'espace-temps réel.

Vigier précise que le rétablissement de la continuité avec la physique classique n'est pas pour autant synonyme de retour au déterminisme laplacien. Dans son analyse qui se veut dialectique de l'évolution des sciences, il remarque que les succès de la physique classique portent en eux-mêmes leurs échecs. En physique classique, le réalisme est garanti par l'expression des lois dans l'espace euclidien, sorte de scène de théâtre sur laquelle se déroule l'ensemble des phénomènes. Il définit le déterminisme classique comme découlant de l'expression du principe fondamental de la dynamique, ou seconde loi de Newton, $\Sigma \boldsymbol{F}_{ext} = m\boldsymbol{a}$ reliant l'accélération des corps aux champs de

21. Jean-Pierre Vigier, «Le matérialisme d'Einstein et l'æther de Dirac», *Communications* 41 (1985) : 27-61.
22. Kragh, *Dirac*, 203.
23. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 6.

forces. Or, remarque Vigier, les champs sont, en mécanique, une donnée primitive de la théorie, dans le sens où la mécanique ne fournit aucune explication ni sur leur nature ni sur leur origine. Cette séparation ontologique entre les particules et les champs, qui conduit à deux classes de théories, les lois des mouvements mécaniques et les équations du champ, est pertinemment analysée comme la cause fondamentale de la faillite des théories classiques[24] :

> Nous ne rappellerons pas ici les succès éclatants et les échecs expérimentaux de cette théorie. Nous noterons seulement qu'elle présente des difficultés internes qu'il n'a pas été possible de résoudre.
>
> La première, c'est qu'il est impossible, dans ce schéma, de comprendre la nature des champs classiques. En particulier, la séparation des notions de cadre spatiotemporel et de champ soulevait inévitablement le célèbre problème de l'action à distance. Par ailleurs, la forme donnée par Maxwell aux équations du champ électromagnétique suggérait des effets de propagation continue difficilement conciliables avec les idées classiques.
>
> La seconde, c'est qu'il est impossible de comprendre la nature des lois du mouvement, c'est-à-dire l'interaction entre les champs et les particules.[25]

Vigier rappelle que les tentatives pour remédier à ces difficultés tout en préservant le cadre classique se sont toutes heurtées à de cuisants échecs. C'est le cas de l'introduction de l'éther pour expliquer l'interaction à distance, éther qui n'a pu être mis en évidence avant d'être définitivement écarté par la relativité d'Einstein de 1905. La physique classique s'est ainsi montrée incapable de décrire convenablement le monde microscopique et macroscopique.

Ainsi, lorsque Vigier critique l'abandon de « la notion classique de connaissance » par l'école de Copenhague, il faut le comprendre avant tout au sens des grands principes épistémologiques, mais pas dans la forme spécifique des lois. Pour Vigier, une description strictement classique des phénomènes quantiques serait par avance condamnée à l'échec. Ces principes sont une formulation des lois indépendante de toute référence aux moyens d'observations, l'objectivité, ainsi qu'une description déterministe des mouvements dans le cadre spatiotemporel à quatre dimensions. Ces deux principes sont les piliers du réalisme de Vigier. Ils possèdent à la fois une valeur épistémique, les lois de la physique doivent être déterministes et ne pas faire référence à l'observateur, et ontologique, puisque ces lois sont le reflet d'une réalité extérieure existant indépendamment de l'observateur.

Vigier souligne que les découvertes expérimentales depuis l'avènement des quanta imposent des contraintes de taille sur le type de réalisme auquel peut prétendre son

24. Pour une analyse conceptuelle et contemporaine de la séparation entre champs et particules en électrodynamique classique, voir : Peters Vickers, *Understanding Inconsistant Science* (Oxford : Oxford University Press, 2013).

25. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 2–3.

modèle. Il doit en effet être en accord avec l'ISMQ tout en proposant une loi satisfaisante des interactions entre la matière et les champs. La principale contrainte est la dualité onde-corpuscule, qu'il qualifie dans des mots qu'il emprunte à de Broglie de « grand et véritable drame de la Microphysique contemporaine ».[26] La première tâche qui incombe à la théorie est de parvenir à unifier ces deux aspects, à première vue contradictoires, dans un formalisme unifié.

Pour cette raison, Vigier argue qu'il faut distinguer le déterminisme de l'ICMQ de celui laplacien de la mécanique classique. Cette distinction, encore floue dans la thèse, va se préciser avec le temps. Au contact de Bohm, Vigier va profondément réviser sa conception du déterminisme jusqu'à proposer conjointement avec Bohm une synthèse dialectique originale entre le déterminisme et le hasard. Le concept d'objectivité est quant à lui pris dans son acceptation la plus classique classique, celle de l'effacement du sujet pensant qui laisse la nature s'exprimer.[27] Cette objectivité est radicalement différente de celle de Bohr qui s'intéresse au langage et aux conditions par lesquelles les faits expérimentaux peuvent être communiqués sans ambigüité. Pour cette raison, Vigier qualifie, un petit peu à l'emporte-pièce, la pensée de Bohr de subjectiviste. Il faut alors repartir d'une définition convenable des particules qui, d'après la découverte de la dualité onde-corpuscule, ne peuvent pas être considérées comme des points matériels. La solution préconisée par Vigier consiste à représenter les particules comme une région singulière d'un phénomène étendu, autrement dit de revenir à la forme de la double solution abandonnée par de Broglie en 1927. Dans celle-ci, les particules sont des singularités ponctuelles d'un champ quantique. C'est d'ailleurs une particularité de l'ICMQ que d'attribuer au champ Ψ une signification physique comme peut l'être le champ électromagnétique dans la théorie de Maxwell. Nous aurons l'occasion de rediscuter ce point fondamental caractéristique de l'ICMQ en conclusion du chapitre 7 (voir la section 7.3 page 225). De plus, Vigier précise que la singularité n'est qu'une approximation mathématique puisque d'après le critère de réalisme, de tels points ne peuvent exister dans la nature. Les particules possèdent nécessairement une structure étendue dans l'espace. Pour l'électron, l'ordre de grandeur est de 10^{-13} cm, ce qui correspond au rayon classique de l'électron de Lorentz et la valeur pour laquelle Bohm suppose dans son article de 1952 que les statistiques quantiques usuelles cesseront d'être valables.[28] Envisager la matière comme une substance unique possède en outre l'avantage de pouvoir s'affranchir du concept de vide en physique. Dans le matérialisme de Vigier, le vide, comme la ponctualité des particules, est une abstraction. Le monde est nécessairement continument empli de matière et d'énergie. Il n'hésite pas à citer Faraday pour appuyer son propos, manière de revendiquer une fois de plus cet héritage

26. Ibid., 3.
27. Lorraine Daston et Peter Galison, *Objectivity* (Cambridge, MA : MIT Press, 2007).
28. Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 2 », 178–179.

classique :

> J'éprouve une grande difficulté à concevoir des atomes de matière supposés dans les solides, fluides et vapeurs, plus ou moins séparés les uns des autres et baignant dans un espace non occupé par des atomes ; et j'aperçois de grandes contradictions découlant d'un tel point de vue. Je ne peux imaginer de différence entre une petite particule dure et les forces qui l'entourent. La matière d'un atome touche celle de son voisin. La matière est par là continue d'un bout à l'autre. La matière emplit tout l'espace, ou du moins tout l'espace où s'étend la gravitation.[29]

En utilisant le même critère du réalisme, Vigier critique également la restriction de la théorie quantique aux seules équations linéaires qui ne trouve d'autre justification que la description probabiliste des phénomènes. En effet, seules les équations linéaires peuvent garantir la loi de composition des probabilités (la solution est carrée-sommable).[30] Or, ajoute-t-il, la nature n'a aucune raison de « préférer » les phénomènes linéaires. Vigier présume d'ailleurs du contraire et souhaite orienter la double solution vers un modèle non linéaire.

Le réalisme scientifique est ainsi élevé au rang de critère épistémologique. Nous avons pu constater que Vigier établit un lien de causalité entre, d'une part, l'abandon du déterminisme et du réalisme et, d'autre part, les difficultés purement théoriques. Dans une attitude anti-positiviste, Vigier ne dresse pas de frontière absolue entre ce qui relève du domaine de la physique et de la philosophie. Vigier précise que cette imbrication entre science et philosophie n'est pas l'apanage de l'ICMQ. Toute théorie physique possède une charge philosophique, ainsi il va pour l'ISMQ :

> Si les micro-objets ne peuvent être correctement décrits dans le cadre de l'espace et du temps, il est vain de s'interroger sur leur structure individuelle, car une telle structure introduirait dans la théorie des paramètres cachés incompatibles avec la notion de complémentarité.
>
> De tels interdits, sorte de limitation irréductible de la nature de nos connaissances, relèvent d'une prise de position philosophique, non d'une nécessité expérimentale.[31]

Pour Vigier, la démarche scientifique est celle qui émet des lois objectives et déterministes et le travail du physicien ne peut pas se restreindre à la seule formulation de lois expérimentales testables. Il doit produire un discours intelligible sur le réel. La philosophie en devient normative par le critère du réalisme. Une posture critiquée rétrospectivement par certains de ses anciens collaborateurs comme Lochak qui y voit une attitude dogmatique et militante plutôt que physicienne.[32]

29. L'authenticité de cette citation n'a pas pu être établie. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 46–47.
30. Ibid., 9.
31. Ibid., 8–9.
32. Georges Lochak, entretien avec l'auteur, 11 mars 2014.

Cette intrication entre la théorie et son interprétation est la raison pour laquelle Vigier ne tente pas de réinterpréter différemment les équations de la mécanique quantique, mais cherche au contraire à établir une théorie alternative. Vigier signifie ainsi qu'il n'existe qu'une seule interprétation possible du formalisme quantique standard, celle de la complémentarité (que nous appelons ISMQ). La théorie et son interprétation ne sont pas disjointes, mais constituent au contraire un complexe que l'on peut dénommer « théorie-interprétation ». Tous les marxistes ne partagent pas ce point de vue. Dans les débats propres aux communistes abordés au chapitre 8, nous verrons que certains, comme François Lurçat, considèrent au contraire qu'il faut accepter la théorie quantique, mais en interprétant son formalisme de telle manière qu'il soit satisfaisant du point de vue de la philosophie marxiste. Il s'agit également de l'attitude adoptée par Langevin et Solomon dans l'entre-deux-guerres (voir la section 8.1 page 239).

À partir son analyse épistémico-philosophique de la physique quantique, Vigier établit un programme de recherche pour l'ICMQ auquel il va apporter les premières pierres dans sa thèse. Ce programme consiste en un approfondissement de la théorie de la double solution de de Broglie qui vise à unifier les comportements corpusculaire et ondulatoire de la matière. Vigier préconise également d'orienter la théorie vers des équations non linéaires dont il va émettre des conditions générales sur les solutions, valables quel que soit le type d'équation. Enfin, dans une perspective à plus long terme, il espère que la double solution servira de point de départ pour unifier la gravitation et les quanta.

3.2 L'onde à singularité et la structure étendue des particules

3.2.1 L'unité onde-corpuscule à travers l'expérience des fentes d'Young

La première illustration choisie par Vigier en faveur de son modèle est une explication de l'expérience des fentes d'Young. L'expérience est fondatrice de l'optique ondulatoire classique du début du XIXe siècle,[33], mais demeure au stade d'expérience de pensée dans le cadre quantique. La première obtention d'une figure d'interférence par des fentes avec d'autres particules que des photons date de 1961, par le physicien allemand de l'université de Tübingen Claus Jönsson.[34] Jusqu'alors, ce sont des cristaux qui

33. Il n'est d'ailleurs pas établi avec certitude que Thomas Young ait lui-même réalisé l'expérience avec deux fentes. Andrew Robinson, *The last man who knew everything* (New York City, NY : Pi Press, 2006), 113–129.

34. Claus Jönsson, «Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten», *Zeitschrift für Physik* 161 (1961) : 454-474.

sont employés pour diffracter la matière, comme lors de l'expérience de Davisson. et Germer de 1927 Les résultats et leur interprétation demeurent néanmoins identiques dans l'un et l'autre des dispositifs.

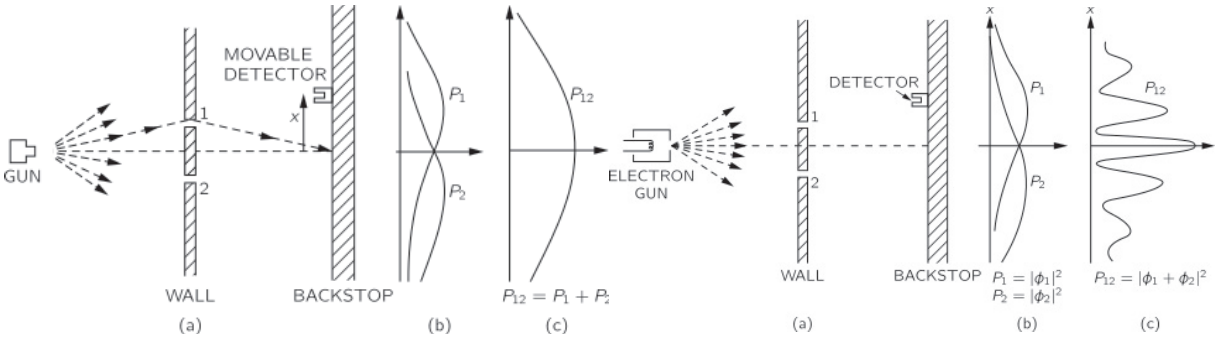
Cette expérience et ses nombreuses variantes sont, aux côtés de celle du chat de Schrödinger, les plus emblématiques des débats quantiques de l'avant-guerre, popularisées par la querelle entre Bohr et Einstein.[35] Feynman, dans ses *Lectures on Physics*, considère qu'elle contient « l'unique mystère» de la mécanique quantique.[36] L'expérience passionne encore aujourd'hui les physiciens. Sa réalisation avec un seul électron est élue la plus belle expérience de physique de tous les temps par les lecteurs de la revue *Physics World* en 2002, devant entre autres celle de Galilée sur la chute des corps et celle de Newton sur la décomposition de la lumière.[37]

Son caractère intrigant réside en sa mise en évidence du comportement ondulatoire de la matière, y compris lorsque les particules sont envoyées une par une. Dans ce cas, les points d'impact des particules se répartissent pour recréer une figure d'interférence, comme si les particules individuelles interféraient avec elles-mêmes. Il est impossible d'expliquer cette répartition des points sur l'écran par une interprétation purement corpusculaire de la matière. En effet, dans celle-ci, les particules atteignant l'écran passeraient nécessairement par l'une ou l'autre des fentes, et leurs trajectoires dépendraient uniquement de la fente empruntée.

On pourrait, avec Feynman, modéliser ce système comme composé d'un pistolet tirant des balles en direction des fentes avec un angle de tir qui varie aléatoirement afin de simuler l'indéterminisme des conditions initiales. Les schémas 3.1a et 3.1b, extraits de ses *Lectures on Physics*, représentent cette situation. La probabilité d'impact d'une balle sur une région donnée de l'écran est la somme $P_{1,2} = P_1 + P_2$, où P_1 et P_2 correspondent respectivement à la probabilité des impacts des balles ayant emprunté la fente 1 et 2 (voir figure 3.1a). Or, les particules quantiques ne se comportent pas comme des balles de pistolet, mais comme des ondes. La probabilité ne suit par une simple loi additive, mais est égale à la somme des probabilités au carré : $P_{1,2} = |P_1 + P_2|^2$ (voir la figure 3.1b) Ce comportement est un argument de poids en faveur d'une interprétation purement probabiliste de la fonction d'onde. Le module au carré de l'onde $|\Psi|$, équivalent à l'intensité de l'optique ondulatoire, renseigne sur la probabilité d'impact des particules.

Autre propriété remarquable, la figure d'interférence disparait immédiatement si l'on tente de déterminer par quelle fente la particule est passée (en plaçant un détec-

35. Kaiser, *How the Hippies Saved Physics*, 3–13.
36. Richard Feynman, Robert B. Leighton et Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics : Volume III : Quantum Mechanics* (New York, NY : Basic Books, 2011), 1-2.
37. Robert P. Crease, «The most beautiful experiment», *Physics World* 15 (2002) : 19-20.
38. Richard Feynman, Robert B. Leighton et Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics : Volume III : Quantum Mechanics* (New York, NY : Basic Books, 2011), 1–2 et 1–5.



(a) Représentation corpusculaire *(b) Représentation ondulatoire*

Fig. 3.1: Canon à électron dans une représentation corpusculaire et ondulatoire de la matière (Schémas de Feynman).[38]

teur en 1 ou en 2). Bohr et ses disciples expliquent ce phénomène par un argument contextualiste. En raison du principe de complémentarité, la localisation de la particule avant son impact sur l'écran modifie le contexte pour une expérience dans laquelle la particule adopte un comportement corpusculaire pour lequel aucune figure d'interférence ne peut se créer. Le contexte fixe par avance le type de questions que l'on peut poser au système ainsi que les réponses que l'on est en droit d'attendre. Cette interprétation contextualiste s'oppose celle semi-classique des inégalités de Heisenberg. Cette dernière est fréquemment mobilisée pour expliquer l'expérience de pensée du microscope de Heisenberg. La mesure de la position modifie la quantité de mouvement par l'interaction du photon émis avec la particule observée, empêchant toute mesure simultanée de ces deux observables. Toutefois, cette explication présuppose que la particule possède une position et une vitesse que la mesure viendrait perturber. Or, comme le remarque justement Vigier, elle ne correspond pas à la pensée de Bohr :

> En toute rigueur, la particule qui vient de la gauche de la figure n'existe pas en tant que particule avant d'avoir atteint l'écran. La figure d'interférence est essentiellement liée à la non-existence d'une trajectoire de la particule et non, comme certains l'on dit, croyant exprimer la pensée de l'École de Copenhague, à l'impossibilité pratique d'observer cette trajectoire sans détruire du même coup le phénomène d'interférence.[39]

En effet, la notion d'interférence est étrangère à celle de trajectoire. La théorie quantique se refuse à tout discours sur ce qui se déroule entre la source et l'écran puisque ce n'est pas du domaine de l'observable, car comme nous l'avons rappelé, toute mesure détruirait inéluctablement la figure d'interférence. C'est le principal point d'achoppement de Vigier avec l'ISMQ qu'il qualifie pour cette raison de positiviste.

Dans l'interprétation des fentes d'Young proposée par Vigier telle que représentée par la figure 3.2, les impacts détectés sur l'écran correspondent aux particules qui ont

39. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 9.

réussi à franchir la fente A ou B (la majorité des particules sont directement stoppées en I). Elles suivent des trajectoires réelles. Cependant, les champs qui supportent les singularités, en tant que phénomènes étendus, sont soumis aux lois ondulatoires. Ils se diffractent comme une onde lumineuse et interfèrent après leur passage en I. Ainsi, du point de vue individuel, la particule interagit avec son propre champ, modifiant par la même occasion la trajectoire de la singularité. Dans sa thèse de doctorat, Fer effectue les calculs et montre rigoureusement que les trajectoires des particules dans la théorie de la double solution se dirigent effectivement vers les franges claires de la figure d'interférences.[40]

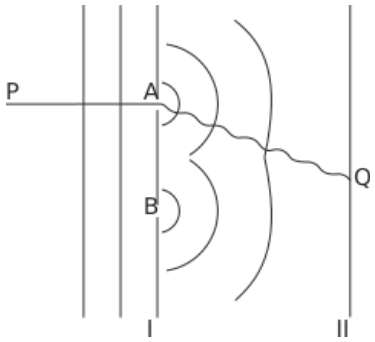


Fig. 3.2: L'expérience des fentes d'Young dans la représentation causale, schéma de Vigier.[41]

Cette explication des phénomènes de diffraction et d'interférence met au jour une différence conceptuelle importante entre les variables cachées de Bohm et la théorie de la double solution de de Broglie et de Vigier. La théorie de Bohm est essentiellement corpusculaire et la dualité onde-particule n'apparait pas en tant qu'entité théorique. Le champ Ψ intervient comme un champ de force par qui se matérialise par un potentiel quantique qui va agir sur la particule.[42] Bohm maintient ainsi la division classique critiquée par Vigier entre les champs et la matière. Au contraire, l'approche de de Broglie et Vigier est plus audacieuse dans sa représentation unifiée de la dualité onde corpuscule par l'introduction d'une nouvelle entité mathématique, l'onde à singularité.

40. Fer, « Les solutions singulières des équations d'onde et la théorie de la double solution », 87 et 99.
41. Jean-Pierre Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta* (Paris : Gauthier-Villars, 1956), 4.
42. Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 1 », 173–174.

3.2.2 Les équations non linéaires comme justification du théorème de guidage de Louis de Broglie

Considérations générales sur la forme des solutions

Le modèle proposé par Vigier impose une contrainte de taille sur les équations : celles-ci doivent être non linéaires. En effet, alors que la mécanique quantique requiert l'emploi d'équations linéaires afin de satisfaire à la loi de composition des probabilités, le modèle à singularité est, au contraire, par essence non linéaire. Vigier le justifie parce qu'en théorie linéaire, la somme de deux solutions est encore solution de l'équation, ce qui impliquerait, dans le modèle à singularité, une part d'arbitraire dans la caractérisation des trajectoires des particules.[43] En l'absence de critères physiques, Vigier n'est pas capable de préciser quelle équation non linéaire parmi l'infinité de possibilités gouverne les objets de l'ICMQ. Pour cette raison, il se cantonne à formuler les hypothèses les plus générales possible, valables quelles que soient les équations choisies.

Pour cette même raison, Vigier prend soin de préciser que la singularité n'est qu'une approximation mathématique. Elle est une région particulière du champ qui apparait comme une approximation convenable à l'échelle de la théorie quantique. L'étude de la forme exacte de cette singularité sera l'objet futur de la théorie et dépendra évidemment des formes des équations. Cependant, grâce au postulat de raccord des phases entre l'onde régulière et l'onde singulière, les formes spécifiques de ces équations ne sont pas requises pour déterminer les trajectoires des particules.

La solution la plus générale des équations non linéaires proposée par Vigier est une fonction $u = f \cdot \mathrm{e}^{i\frac{\omega}{\hbar}}$. Comme le modèle doit, *a minima*, être compatible avec les résultats déjà établis de la théorie linéaire usuelle, Vigier ajoute que la singularité doit être circonscrite dans une petite région r_0 de l'ordre de grandeur du rayon classique de l'électron. À distance raisonnable de la singularité, le champ u est proportionnel au champ Ψ de la mécanique quantique. Cette astuce mathématique de la proportionnalité permet d'éviter d'attribuer à l'onde Ψ une double nature, probabiliste et physique, ce que de Broglie contestait dans la théorie de Bohm (voir la section 2.1 page 60). Dans le modèle de Vigier, seul le champ u est physique. La contribution de la partie non linéaire ne devient significative qu'à proximité de la singularité, à l'intérieur de r_0. Selon ces hypothèses, Vigier décompose la fonction u en la somme de deux fonctions, u_0 et φ de sorte que (voir la figure 3.3) :

- $u_0 + \varphi$ est solution de l'équation non linéaire
- à l'extérieur de la surface de rayon r_0, u_0 satisfait à une équation linéaire ;

43. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 47.

- à grande distance du centre de la particule, $(r > r_1)$, u se confond avec φ.

Cette décomposition est une généralisation de la théorie de la double solution de de Broglie. Les deux ondes sont :

- l'onde physique $u = f \cdot \mathrm{e}^{i\frac{\omega}{\hbar}} = u_0 + \varphi = u_0 + R \cdot \mathrm{e}^{i\frac{S}{\hbar}}$;
- une onde de probabilité $\Psi = \mathrm{Cste} \cdot \varphi$.

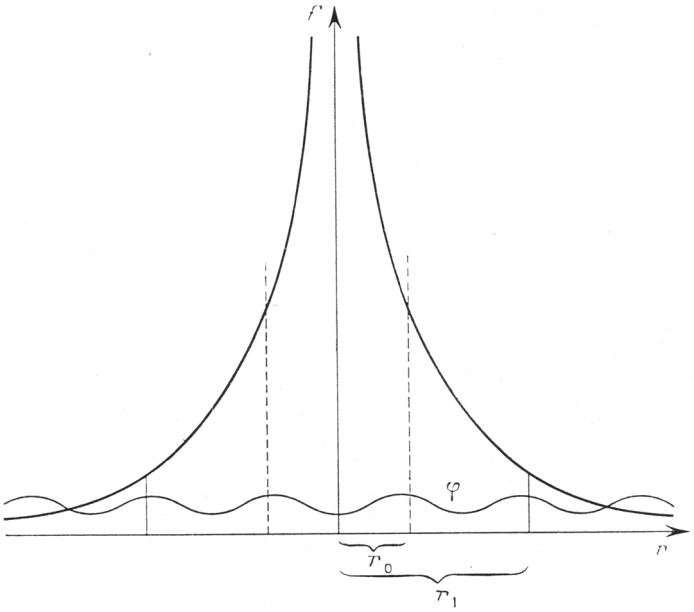


Fig. 3.3: Représentation graphique de la fonction à singularité et de sa partie régulière. Extrait de la thèse de Jean-Pierre Vigier.[44]

Il reste désormais à Vigier de trouver comment raccorder les deux fonctions u_0 et φ au voisinage de r_0. Vigier démontre que les conditions de raccordement permettent de démontrer le théorème de guidage $\boldsymbol{v} = \frac{\nabla S}{m}$ de de Broglie, qui, en 1927, avait posé tant de problèmes et était l'une des raisons de l'abandon provisoire de la double solution au profit de la théorie de l'onde pilote.

La démonstration du théorème de guidage

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il nous faut préalablement préciser que la démonstration du théorème de guidage de Vigier ne brille pas par la clarté de ses explications. En particulier, Vigier saute quelques étapes bien utiles à la compréhension. Francis Halbwachs, dans sa thèse soutenue en 1960, la reprend en explicitant les hypothèses physiques ainsi que les différentes étapes de calcul.[45] Une différence entre

44. Jean-Pierre Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta* (Paris : Gauthier-Villars, 1956), 52.

45. Halbwachs, « Recherches sur la mécanique du corpuscule tournant relativiste et l'hydrodynamique relativiste des fluides dotés d'une densité de moment angulaire interne», 8–11.

les deux démonstrations est l'emploi par Vigier des notations relativistes, mais ceci ne change pas fondamentalement les raisonnements. Pour se faire une idée de la différence de style entre Vigier et Halbwachs, les deux schémas accompagnant leurs démonstrations respectives sont reproduits côte à côte par la figure 3.4. À des fins de clarté, certaines précisions apportées par Halbwachs sont ajoutées à la démonstration originale de Vigier.

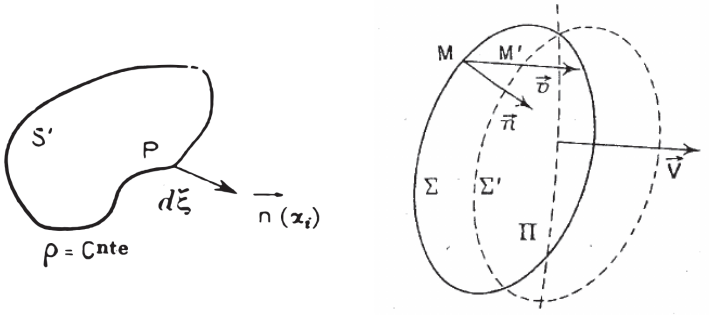


Fig. 3.4: Schémas accompagnant les démonstrations du théorème de guidage. À gauche, celui de Vigier, à droite celui de Halbwachs.[46]

Vigier commence par adopter un modèle hydrodynamique dans lequel il retranscrit les hypothèses générales émises sur l'onde à singularité. Les particules sont ainsi localisées en des zones d'un fluide conservatif de densité ρ supérieure aux valeurs extérieures, ce que Vigier appelle une « bosse». Cette bosse est enclose dans une surface S' (Σ sur le schéma de Halbwachs) de petite dimension qui se déplace en bloc à la « vitesse d'univers» (quadrivitesse) v_μ, de sorte que sa densité demeure constante au cours du temps. L'hypothèse sur la densité implique que celle-ci croit très rapidement au voisinage de la surface S'. L'hypothèse de raccord entre les ondes régulière et singulière implique qu'à distance de S', $\rho = \rho_r$ où ρ_r désigne la densité du fluide régulier, sans bosse. Vigier déduit de ces hypothèses que :

$$\frac{\rho}{\partial\rho/\partial r} \simeq 0 \tag{3.1}$$

Elle exprime la propriété que le gradient de ρ, qui exprime sa variation équivalente à la pente de la tangente en un point, est très supérieur à ρ. Halbwachs formule différemment ces mêmes hypothèses dont il montre qu'elles ne nécessitent pas le recours à l'hydrodynamique. Elles constituent pour lui les conditions de résonance entre les deux ondes. La démonstration nécessite seulement de postuler qu'il existe une surface Σ de l'onde à singularité, située entre r_0 et r_1, sur laquelle la densité $\rho = f^2$ est constante

46. Jean-Pierre Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta* (Paris : Gauthier-Villars, 1956), 53 ; Francis Halbwachs, «Recherches sur la mécanique du corpuscule tournant relativiste et l'hydrodynamique relativiste des fluides dotés d'une densité de moment angulaire interne» (thèse de doct., Faculté des Sciences de Paris, 1958), 10.

en tout point et pour laquelle les phases ω de l'onde totale, et S de l'onde régulière, ainsi que leurs dérivées premières, sont égales. La qualité d'onde à singularité de u implique que la densité ρ croît rapidement avec $\frac{1}{r}$, d'où la relation $\frac{\rho}{\partial\rho/\partial r} \simeq 0$.

Vigier considère le déplacement d'un point P *quelconque* de la surface au cours de l'intervalle de temps $\mathrm{d}t$ (un déplacement entre M et M' sur le schéma de Halbwachs). Il introduit également le vecteur $\boldsymbol{n}$ normal et unitaire en un point de la surface S', dont les composantes α^i sont ses cosinus directeurs. Selon les notations de Halbwachs, la densité en M' s'écrit :

$$\rho_{M'} = \rho_M + \frac{\partial\rho}{\partial t}\mathrm{d}t + \frac{\partial\rho}{\partial x^i}\alpha^i \mathrm{d}\xi \tag{3.2}$$

Cette équation exprime simplement la variation de la densité et correspond à la différentielle totale de ρ.

Comme par hypothèse la surface s'est déplacée en bloc, les valeurs prises par la densité en M et, M' sont égales : $\rho_{M'} = \rho_M$.[47] La densité constante implique une autre propriété sur les composantes du vecteur normal unitaire $n^i = \alpha^i$ qui n'est pas explicitée dans la démonstration de Vigier : sur tout S', $\boldsymbol{n}$ est colinéaire au vecteur gradient $\boldsymbol{\nabla}\rho$. En normalisant, ces composantes s'écrivent :

$$n^i = \alpha^i = \frac{\partial\rho/\partial x_i}{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial\rho}{\partial x^i}\right)^2}} \tag{3.3}$$

Il vient, en substituant cette relation dans l'équation (3.2) :

$$v_n = \frac{\mathrm{d}\xi}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial\rho/\partial t}{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial\rho}{\partial x^i}\right)^2}} \tag{3.4}$$

où v_n est ce que Vigier appelle la « vitesse normale de déplacement », étant donné que l'équation (3.2) est dérivée selon la direction du vecteur normal ($\mathrm{d}x^i = \mathrm{d}\xi\alpha^i$).

Ensuite, Vigier considère l'équation de continuité *au bord* de S', qui, par hypothèse, est égale à celle du fluide régulier :

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{V_i}{V_4}\frac{\partial\rho}{\partial x_i} + \rho\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{V_i}{V_4}\right) = 0 \tag{3.5}$$

Ensuite, en tenant compte de l'équation (3.1), Vigier la divise par la quantité $\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial\rho}{\partial x^i}\right)^2}$ afin de faire apparaitre explicitement v_n :

$$V^i\alpha_i - v_n V^4 = 0 \tag{3.6}$$

47. Vigier saute cette étape et écrit directement $\mathrm{d}\xi\frac{\partial\rho}{\partial x^i}\alpha^i + \frac{\partial\rho}{\partial t}dt = 0$

Vigier exprime la vitesse « normale» $v_n = \boldsymbol{w}.\boldsymbol{n}$ avec $\boldsymbol{w}$ qui signifie qu'elle est le produit scalaire de la vitesse $\boldsymbol{w}$ de la singularité avec le vecteur normal $\boldsymbol{n}$. Les deux solutions possibles sont $(\boldsymbol{v} - v^4\boldsymbol{w})\perp\boldsymbol{n}$ et $v_i - v^4 w_i = 0$. Comme cette égalité doit être vraie quel que soit $\boldsymbol{n}$ (car le point P est quelconque), la solution générale est :

$$w^i = \frac{V^i}{V^4} \tag{3.7}$$

Cette expression signifie que les directions des vitesses de l'onde à singularité $\boldsymbol{\omega}$ et du fluide régulier $\boldsymbol{V}$ sont confondues. Vigier l'interprète en considérant que la bosse est astreinte à suivre une ligne du courant du fluide régulier, ce qui correspond au théorème de guidage de de Broglie.

Vigier applique ensuite cette condition aux équations de Klein-Gordon et de Dirac. Dans le cas des particules scalaires régies par l'équation de Klein-Gordon, l'équation du champ prend la forme $(D_\nu D^\nu - \mu)u = 0$, avec $D_\nu = \partial_\nu + i\frac{\varepsilon}{c}A_\nu$ la dérivée covariante de jauge, dans laquelle intervient un quadripotentiel A_ν, avec μ qui est homogène à une masse au carré.

Vigier remplace la fonction d'onde usuelle par les solutions $u = f\,\mathrm{e}^{i\frac{\omega}{\hbar}}$ et $\varphi = R\,\mathrm{e}^{i\frac{S}{\hbar}}$ de l'ICMQ. D'après le théorème du guidage, il égalise les courants à « bosse» $s^\mu = \rho v^\mu = f^2\left(\partial^\mu\omega - \frac{\varepsilon}{c}A^\mu\right)$ et « régulier» $s_r^\mu = \rho v_r^\mu = R^2\left(\partial^\mu S - \frac{\varepsilon}{c}A^\mu\right)$ et obtient la relation entre les phases des deux ondes :

$$\partial^\mu\omega - \frac{\varepsilon}{c}A^\mu = \partial^\mu S - \frac{\varepsilon}{c}A^\mu \tag{3.8}$$

soit :

$$\omega = S + Cste \tag{3.9}$$

À une constante près, l'onde à singularité et l'onde régulière sont de mêmes phases, ce qui confirme l'idée de de Broglie exposée dès sa thèse de doctorat que le corpuscule peut être comparé à une petite horloge synchronisée avec l'onde qui l'accompagne. Toutefois, la définition du courant de Vigier dans l'équation de Klein-Gordon est problématique. En effet, comme le remarque Takabayasi, ce courant, dont l'expression provient d'une analogie avec le courant de l'équation de Schrödinger, n'est pas défini partout positivement et il faut alors prendre quelques précautions supplémentaires dans la définition de la vitesse et du courant afin qu'ils aient une signification physique (ce point est traité à la section 4.3.4 page 144).

Vigier applique un raisonnement analogue pour l'équation de Dirac $(\alpha^\nu D_\nu - \mu)u = 0$ qui gouverne les particules de spin $\frac{1}{2}$ (ici u, φ , et u_0 sont des spineurs et μ est homo-

gène à une masse) ; il exprime les expressions des courants à bosse s^ν et régulier s_r^ν :

$$\begin{aligned} s^\nu &= u^+\alpha^\nu u &= u^+u\tfrac{u^+\alpha^\nu u}{u^+u} \\ &= (u^+u)v^\nu \\ s_r^\nu &= \varphi^+\alpha^\nu\varphi &= \varphi^+\varphi\tfrac{\varphi^+\alpha^\nu\varphi}{\varphi^+\varphi} \\ &= (\varphi^+\varphi)v_r^\nu \end{aligned} \tag{3.10}$$

En égalisant les vitesses d'univers, Vigier écrit la condition de guidage :

$$\frac{u^+\alpha^\nu u}{u^+u} = \frac{\varphi^+\alpha^\nu\varphi}{\varphi^+\varphi} \tag{3.11}$$

Grâce à cette condition de guidage, Vigier illustre une propriété des particules libres qui doivent être guidées uniquement par leur champ propre, sans interagir avec celui des particules voisines, comme c'est le cas pour deux familles de photons de longueurs d'onde très éloignées qui n'interfèrent pas dans une expérience de fentes d'Young. Vigier le montre pour un système composé de deux champs u_1 et u_2, mais le résultat est aisément généralisable à N particules. Le champ total est simplement la somme des deux ondes $u = u_1 + u_2$. Pour deux particules de spin $\frac{1}{2}$, la vitesse d'univers est donnée par :

$$v^\nu = \frac{u^+\alpha^\nu u}{u^+u} = \frac{(u_1+u_2)^+\alpha^\nu(u_1+u_2)}{(u_1+u_2)^+(u_1+u_2)} \tag{3.12}$$

En supposant que les deux particules sont séparées par une distance bien supérieure à la somme de leurs rayons, au voisinage de la région singulière de la première particule $u \simeq u_1$, la condition de guidage implique que la vitesse de cette particule est :

$$v_1^\nu = \frac{u^+\alpha^\nu u}{u^+u} \simeq \frac{u_1^+\alpha^\nu u_1}{u_1^+u_1} = \frac{\varphi_1^+\alpha^\nu\varphi_1}{\varphi_1^+\varphi_1} \tag{3.13}$$

Il en va de même pour la particule 2. Quand bien même les ondes se superposeraient dans l'espace, leurs mouvements respectifs sont uniquement déterminés par leur propre champ, sans s'influencer mutuellement, comme illustré par la figure 3.5.

À partir de ces résultats, Vigier estime qu'il peut être possible d'interpréter l'ensemble des micro-objets comme une somme $u = u_1 + u_2 + \ldots$ d'un champ physique unique dont le champ fondamental serait celui de Dirac gouvernant les particules de spin $\frac{1}{2}$. En reprenant l'hypothèse de la méthode de fusion de de Broglie, les différentes particules seraient autant de combinaisons d'ondes u_i fondamentales.[49] Cette idée de constituants élémentaires qui, par assemblage, produisent des particules plus complexes est reprise dans le modèle des particules proposé par Vigier et ses collabora-

48. Jean-Pierre Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta* (Paris : Gauthier-Villars, 1956), 57.

49. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 58–59.

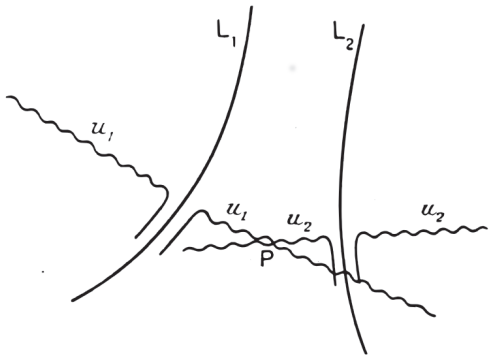


Fig. 3.5: Trajectoires L_1 et L_2 des ondes u_1 et u_2.[48]

teurs de l'IHP, bien que dans une version complètement remaniée. La brique élémentaire n'est plus le champ de Dirac, mais une représentation irréductible d'un groupe de rotation G (voir la section 7.2.4 page 216).

Onde monochromatique contre paquet d'onde

La solution u à singularité préconisée par Vigier ajoute une ambigüité sur sa représentation mathématique. En effet, l'onde à singularité semble incompatible avec une forme mathématique en paquet d'onde. Or, nous avons constaté qu'afin de remédier à la critique de Pauli envers la théorie de l'onde pilote, Bohm substitue un paquet d'onde à l'onde plane monochromatique. De surcroît, il considère ce choix plus physique puisque la particule est nécessairement enclose dans une région, alors qu'elle occupe tout l'espace dans le cas de l'onde plane monochromatique (voir la section 1.2.2 page 51).

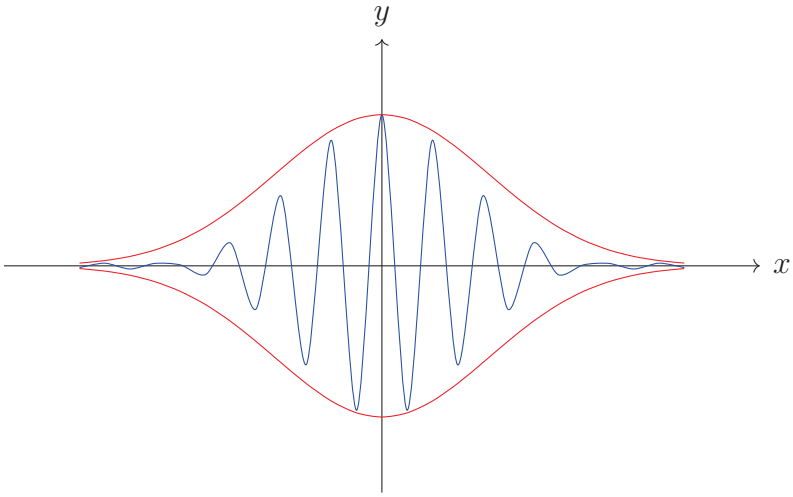


Fig. 3.6: Exemple de paquet d'onde gaussien solution de l'équation de Schrödinger (en bleu) et de son enveloppe (en rouge). La particule se déplace à la vitesse de groupe de l'enveloppe. Dans un milieu dispersif, elle est différente de la vitesse de phase.

Il est intéressant de noter qu'en invoquant également un critère physique, de Bro-

glie arrive en 1927 à la conclusion exactement opposée à celle de Bohm. Après avoir démontré que la vitesse de l'onde dans la théorie de la double solution est mathématiquement équivalente à une vitesse de groupe, il conclut :

> Ce fait remarquable fait penser que le point matériel doit être assimilé à un groupe d'ondes monochromatiques. Cette conception, qui avait été la mienne, a été reprise par M. Schrödinger et l'a conduit à considérer le point matériel comme un « Wellenpacket». Au point de vue didactique, il est très utile d'employer cette image, mais il n'est pas sûr qu'elle corresponde à la réalité.[50]

Dans la suite de l'article, de Broglie définit en effet la vitesse de la particule à l'aide de la désormais célèbre relation de guidage $\boldsymbol{v} = \frac{\nabla S}{m}$. la raison pour laquelle de Broglie peut rejeter le paquet d'onde est que la remarque précédente est formulée dans le cadre de la double solution dans laquelle la particule est localisée par une singularité (voir la section 1.1.4 page 26). De son côté, Bohm adopte le paquet d'onde en ignorant tout de l'existence de la double solution.

Dans sa thèse de doctorat à propos des solutions singulières dans l'ISMQ, Fer discute dès son introduction des choix quoi s'offrent à lui sur les types de solutions. Il oppose explicitement les paquets d'onde aux ondes à singularités ponctuelles. Bien que le paquet d'onde soit mathématiquement adapté pour modéliser une « bosse» et donc permettre une localisation de la particule dans l'espace (voir la figure 3.6), Fer en critique cependant les fondements physiques :

> Une raison physique aurait dû faire écarter d'emblée l'intégrale de Fourier : c'est que les différentes ondes monochromatiques qui la composent sont indépendantes les unes des autres. En introduisant ce mode de représentation, on attribue du même coup à chacune des composantes de l'être complexe qu'on veut représenter une liberté qui n'être pas justifiée ; la structure du corpuscule disparait au profit d'une somme sans cohésion aucune. Il n'est pas étonnant qu'un être aussi désagrégé puisse jouir de la liberté que lui assigne Bohr.[51]

De plus, Fer met le doigt sur une propriété mathématique fatale : un paquet d'onde gaussien solution de l'équation de Schrödinger se disperse au cours du temps pour s'évanouir complètement lorsque $t \to \infty$. Il est donc inenvisageable de l'adopter dans le cadre de l'ICMQ.

Vigier ne traite jamais la question de front. Il semble passer complètement à côté de cette incompatibilité théorique entre la double solution de de Broglie et les variables cachées de Bohm. Lorsqu'il aborde la mesure dans l'ICMQ au chapitre VI, il précise

50. de Broglie, « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement», 227.
51. Fer, « Les solutions singulières des équations d'onde et la théorie de la double solution», 7.

que u adopte la forme d'un paquet d'onde, mais c'est à notre avis uniquement parce ce chapitre est une reprise telle quelle des résultats déjà établis par Bohm, sans ajout particulier hormis quelques précisions mathématiques marginales. L'ambigüité sur la forme de l'onde u est révélatrice de l'état d'avancement réel de l'ICMQ en ce début des années 1950, qui ressemble davantage à un patchwork qu'à une théorie cohérente et solide dans ses fondements.

3.3 Retour sur la description des systèmes à N corps dans l'espace réel et le problème de la non-localité

Considérer les ondes de la mécanique quantique, à la différence de l'ISMQ, comme des entités réelles n'est pas sans poser un problème dans le cas d'un système composé de plusieurs particules. En effet, l'équation de Schrödinger est alors définie dans l'espace fictif de configuration à $3N$ dimensions. Pour de Broglie et Vigier, ceci n'est pas acceptable et chaque onde attachée à sa particule doit se mouvoir dans l'espace réel. Pour cette raison, de Broglie ne considère pas l'équation de Schrödinger comme celle de propagation fondamentale de la mécanique ondulatoire.

En 1927, de Broglie avait déjà encadré le problème en montrant qu'il faudrait pouvoir écrire les équations de Jacobi pour la *i-ème* particule sous la forme $m_i \boldsymbol{v_i} = \boldsymbol{\nabla}_i S = \boldsymbol{\nabla}_i S_i$, où S est la phase de l'onde de l'ensemble des particules et S_i celle de la particule i dans l'espace réel (voir section 1.1.4 page 30). Autrement dit, il s'agit de démontrer que les équations du mouvement sont identiques, qu'elles dérivent de l'espace fictif de configuration ou de l'espace tridimensionnel. Il en va de même pour la force provenant du potentiel quantique $\boldsymbol{\nabla}_i Q = \boldsymbol{\nabla}_i Q_i$. De Broglie, incapable de fournir une réponse satisfaisante en 1927, reprend logiquement le problème après 1952. Il réalise quelques progrès en énonçant un lemme publié au *CRAS* en décembre 1952, connu sous le nom de « conditions de de Broglie ».[52]

3.3.1 Les conditions de de Broglie

Le raisonnement de de Broglie consiste à tenter de montrer qu'en partant de N ondes dans l'espace réel, il est possible de construire l'espace de configuration de la mécanique ondulatoire. Afin de simplifier les calculs, il considère seulement deux ondes, mais le raisonnement est facilement généralisable à N. Pour un tel système, en procédant par analogie avec la mécanique classique, de Broglie écrit les deux équations de

52. Louis de Broglie, « Sur l'interprétation de la mécanique ondulatoire des systèmes de corpuscules dans l'espace de configuration par la théorie de la double solution », *CRAS* 235 (1952) : 1345-1349.

Jacobi dans l'espace réel :

$$\begin{cases} \frac{\partial S_1}{\partial t} = E_1 = \frac{1}{2m_1}(\boldsymbol{\nabla}_1 S)^2 + V_1 + V_{12} + Q_1 \\ \frac{\partial S_2}{\partial t} = E_2 = \frac{1}{2m_2}(\boldsymbol{\nabla}_2 S)^2 + V_2 + V_{21} + Q_2 \end{cases} \tag{3.14}$$

Les fonctions V_1 et V_2 sont les potentiels classiques extérieurs agissant respectivement sur les particules 1 et 2, $V_{12} = V_{21}$ est le potentiel d'action des corpuscules entre eux et Q_1 est le potentiel quantique de la forme $\frac{h^2}{8\pi 2}\left(\frac{1}{m_1}\frac{\Delta_1 R}{R}\right)$ (identiquement pour la particule 2 en substituant les indices). À noter qu'ici les énergies E_1 et E_2 ne se conservent pas individuellement et seule l'énergie totale E est conservative. En admettant la validité de l'équation de Schrödinger dans l'espace de configuration, cette même équation de Jacobi au point $(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2})$ s'écrit :

$$\frac{\partial S}{\partial t} = E = \frac{1}{2m_1}(\boldsymbol{\nabla}_1 S)^2 + \frac{1}{2m_2}(\boldsymbol{\nabla}_2 S)^2 + V_1 + V_2 + V_{12} + Q \tag{3.15}$$

Avec cette fois pour expression du potentiel quantique total :

$$Q = \frac{h^2}{8\pi^2}\left(\frac{1}{m_1}\frac{\Delta_1 R}{R} + \frac{1}{m_2}\frac{\Delta_2 R}{R}\right) \tag{3.16}$$

En tenant compte de (3.14) et (3.15), de Broglie peut exprimer l'énergie totale sous la forme :

$$E = E_1 + E_2 - V_{12} + Q - Q_1 - Q_2 \tag{3.17}$$

L'enjeu pour de Broglie est de transformer cette dernière expression de l'énergie pour que le potentiel quantique Q adopte une forme analogue au potentiel classique V, c'est-à-dire de pouvoir écrire :

$$E = E_1 + E_2 - V_{12} - Q_{12} \tag{3.18}$$

C'est ce qu'il va tenter de démontrer par l'intermédiaire d'un simple lemme qui stipule que la condition nécessaire et suffisante pour que trois fonctions $F_1(x, u)$, $F_2(y, u)$ et $F(x, y, u)$, avec $u(x, y)$, satisfassent à :

$$\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_y = \left(\frac{\partial F_1}{\partial x}\right)_y ; \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_x = \left(\frac{\partial F_2}{\partial y}\right)_x \tag{3.19}$$

est d'avoir :

$$\begin{cases} F_1(x,u) = F_{11}(x) + F_{12}(u) \\ F_2(y,u) = F_{22}(x) + F_{21}(u) \\ F(x,y,u) = F_{11}(x) + F_{22}(x) + F_{12}(u) \end{cases} \tag{3.20}$$

avec $F_{12}(u) = F_{12}(u)$.

Transposé dans le cadre de l'ICMQ, le lemme de de Broglie implique pour un système constitué de deux particules, la phase $S(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}, \boldsymbol{x_{12}}, t)$ et le potentiel quantique $Q(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}, \boldsymbol{x_{12}}, t)$ (où $\boldsymbol{x_{12}} = \boldsymbol{x_1} - \boldsymbol{x_2}$) doivent pouvoir se décomposer comme suit :

$$\begin{cases} S_1(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_{12}}, t) = S_{11}(\boldsymbol{x_1}, t) + S_{12}(\boldsymbol{x_{12}}, t) \\ S_2(\boldsymbol{x_2}, \boldsymbol{x_{12}}, t) = S_{22}(\boldsymbol{x_2}, t) + S_{21}(\boldsymbol{x_{12}}, t) \\ S(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}, \boldsymbol{x_{12}}, t) = S_{11}(\boldsymbol{x_1}, t) + S_{22}(\boldsymbol{x_2}, t) + S_{12}(\boldsymbol{x_{12}}, t) \end{cases} \tag{3.21}$$

$$\begin{cases} Q_1(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_{12}}, t) = Q_{11}(\boldsymbol{x_1}, t) + Q_{12}(\boldsymbol{x_{12}}, t) \\ Q_2(\boldsymbol{x_2}, \boldsymbol{x_{12}}, t) = Q_{22}(\boldsymbol{x_2}, t) + Q_{21}(\boldsymbol{x_{12}}, t) \\ Q(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}, \boldsymbol{x_{12}}, t) = Q_{11}(\boldsymbol{x_1}, t) + Q_{22}(\boldsymbol{x_2}, t) + Q_{12}(\boldsymbol{x_{12}}, t) \end{cases} \tag{3.22}$$

Ces conditions permettent à de Broglie de réécrire l'énergie totale (3.17) :

$$E = E = E_1 + E_2 - V_{12} - Q_{12} = \frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2 + V_1 + V_2 + V_{12} + Q_1 + Q_2 + Q_{12} \tag{3.23}$$

Avec sa condition, de Broglie espère pouvoir traiter le potentiel quantique d'interaction Q_{12} d'une manière analogue au potentiel classique V_{12}.

Vigier donne une interprétation géométrique des conditions de de Broglie dans sa thèse. En fixant $x_2(t)$, la relation $\boldsymbol{\nabla}_1 S = \boldsymbol{\nabla}_1 S_1$ signifie que les surfaces d'équiphases S et S_1 sont tangentes au point $x_1(t)$ qui se situe sur la trajectoire L_1 (voir la figure 3.7).[53] Il

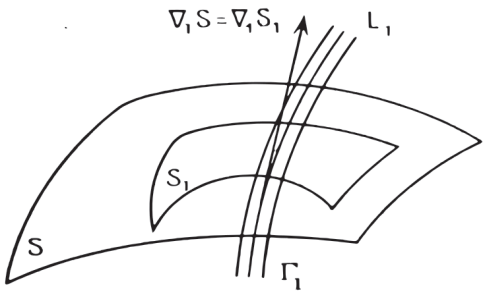


Fig. 3.7: Illustration géométrique des conditions de Louis de Broglie.[54]

faut préciser que le lemme de de Broglie indique une condition nécessaire et suffisante

53. Il s'agit d'un contact d'ordre 1, c'est-à-dire d'égalité des dérivées premières.
54. Jean-Pierre Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta* (Paris : Gauthier-Villars, 1956), 141.

pour pouvoir formuler l'ICMQ dans l'espace réel. Elle ne présume pas que la phase et le potentiel quantique peuvent effectivement être décomposés suivant (3.21) et (3.22). D'ailleurs, de Broglie ne considère pas son raisonnement comme suffisamment rigoureux puisqu'il admet *a priori* ma validité de l'équation de Schrödinger dans l'espace de configuration alors qu'il s'agirait plutôt pour lui d'en démontrer la validité à partir des postulats de la double solution. Autrement dit, il faudrait déduire l'équation dans l'espace de configuration à partir des équations de l'espace réel.

3.3.2 La justification de l'utilisation de l'espace de configuration dans la théorie causale

Vigier va alors tenter de lever cette dernière difficulté dans une note aux *CRAS*[55] qu'il reprend et complète dans le cinquième chapitre de sa thèse.[56]

Son raisonnement consiste à faire le chemin inverse de celui employé par l'ICMQ jusqu'à présent : partir de l'équation de continuité dans l'espace de configuration, qui est valable en toute circonstance puisqu'elle garantit la conservation de la densité des particules au cours du temps (ou des probabilités dans l'ISMQ), pour remonter à l'équation de Schrödinger.

$$\frac{\partial R^2}{\partial t} + \frac{\hbar}{m_1}\boldsymbol{\nabla}_1 \cdot (R^2 \boldsymbol{\nabla}_1 S) + \frac{\hbar}{m_2}\boldsymbol{\nabla}_2 \cdot (R^2 \boldsymbol{\nabla}_2 S) = 0 \tag{3.24}$$

Vigier cherche alors à établir une équation linéaire générale sur Ψ avec $R = \Psi\Psi^\star$. Il montre que la forme la plus générale de cette équation linéaire est :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} - \frac{\hbar}{2m_1 i}\nabla_1^2 \Psi - \frac{\hbar}{2m_2 i}\nabla_2^2 \Psi = \frac{i}{\hbar} k \Psi \tag{3.25}$$

À partir de l'hypothèse sur la linéarité et en utilisant un théorème d'André Régnier,[57] il déduit que k est une fonction des seuls $\boldsymbol{x_1}$, $\boldsymbol{x_2}$ et t. Pour en déterminer l'expression exacte, il décompose (3.25) en sa partie réelle et imaginaire, qui redonne (3.24) ainsi que l'équation de Jacobi :

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{2m_1}(\boldsymbol{\nabla}_1 S)^2 + \frac{1}{2m_1}(\boldsymbol{\nabla}_2 S)^2 + \hbar k - \frac{\hbar^2}{2}\left[\frac{1}{m_1}\frac{\nabla_1^2 R}{R} + \frac{1}{m_2}\frac{\nabla_2^2 R}{R}\right] \tag{3.26}$$

Par hypothèse de la théorie de la double solution, à la limite $\hbar \to 0$, Vigier considère que cette dernière doit se réduire à l'équation de Jacobi de l'optique géométrique

55. Jean-Pierre Vigier, « Mécanique ondulatoire dans l'espace de configuration », *CRAS* 235 (1954) : 1372-1375.
56. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 139.
57. André Régnier, « Sur la conservation de la charge », *CRAS* 235 (1954) : 1370-1372.

classique. Il en déduit une expression de k :

$$k = V_1(\boldsymbol{x_1}) + V_2(\boldsymbol{x_2}) + V_{12}(\boldsymbol{x_{12}}) \tag{3.27}$$

Cette dernière expression remplacée dans l'équation (3.25) donne :

$$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2m_1}\nabla_1^2\Psi + \frac{\hbar^2}{2m_2}\nabla_2^2\Psi - [V_1 + V_2 + V_{12}]\,\Psi \tag{3.28}$$

Vigier pense ainsi avoir retrouvé l'équation de Schrödinger déduite à partir de l'hypothèse de la linéarité de l'équation et de l'équation de continuité. Il en conclut qu'à partir des conditions de de Broglie et de sa démonstration, il est légitime de décrire les ondes physiques de la double solution dans l'espace de configuration.

La démonstration de Vigier est cependant problématique. Comme le relève Andrade e Silva quelques années plus tard dans sa thèse de doctorat, il est étrange que les ondes physiques ne jouent strictement aucun rôle dans cette démonstration. D'autre part, la démonstration comporte une erreur. Andrade e Silva remarque que la forme la plus générale de la fonction k n'est pas la forme donnée par Vigier mais est $k = V_1(\boldsymbol{x_1}) + V_2(\boldsymbol{x_2}) + V_{12}(\boldsymbol{x_{12}}) + F(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2})$ où F est une fonction réelle indéterminée.[58]

De Broglie aborde le problème différemment et propose à cet effet une piste dans deux notes aux *CRAS* parues en aout 1954.[59] Par une méthode qui rappelle celle de 1927 dans laquelle il déduisait le mouvement d'une particule en admettant connu celui de l'autre, il propose d'établir les trajectoires des particules en employant une procédure courante en mécanique classique pour traiter les problèmes à plusieurs corps en passant par la masse réduite $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}$. Cela équivaut à effectuer un changement de repère qui prend comme origine la position de l'une des particules pour étudier le mouvement relatif de la seconde par rapport à ce nouveau référentiel non galiléen. Si, par exemple, l'origine du repère est fixée sur la particule 2, l'équation de propagation de l'onde $u_1^* = R_1^*(x^*, y^*, z^*, t)\,\mathrm{e}^{i\frac{S_1^1(x^*,y^*,z^*,t)}{\hbar}}$ s'exprime de la façon suivante (le signe $*$ signifie ici que les coordonnées sont exprimées dans ce repère relatif) :

$$\frac{\hbar}{i}\frac{\partial u_1^*}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2\mu}\left(\frac{\partial^2 u_1^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u_1^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 u_1^*}{\partial z^{*2}}\right) + V(r) \tag{3.29}$$

Une trajectoire possible L_1^* de la particule 1 est l'une des courbes orthogonales à la surface $S_1^* = \text{constante}$ définie par l'équation $\boldsymbol{v_1^*} = \frac{1}{m}\nabla^* S_1^*$. Tous les raisonnements

58. João Andrade E Silva, «La théorie des systèmes de particules dans l'interprétation causale de la Mécanique ondulatoire», *Ann. IHP* 16, n° 4 (1960) : 298–299.

59. Louis de Broglie, «Considérations de Mécanique classique préparant la justification de la Mécanique ondulatoire dans la théorie de la double solution», *CRAS* 239 (1954) : 521-524 ; Louis de Broglie, «Justification, du point de vue de la théorie de la double solution, de la Mécanique ondulatoire des systèmes dans l'espace de configuration», *CRAS* 239 (1954) : 565-567.

précédents sont identiquement applicables à la deuxième particule. La conservation du moment $m_1x_1 + m_2x_2 = 0$ permet alors de déduire les trajectoires L_1 et L_2 dans le repère galiléen. Enfin, de Broglie écrit l'équation de propagation dans l'espace de configuration :

$$\frac{\hbar}{i}\frac{\partial\Psi^*}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2\mu}\left(\frac{\partial^2\Psi^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2\Psi^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2\Psi^*}{\partial z^{*2}}\right) + V(r) \tag{3.30}$$

Puisque u_1^*, u_2^* et Ψ^* sont gouvernées par la même équation de propagation, de Broglie en conclut l'égalité entre leurs phases et potentiels quantiques. Il l'interprète comme la justification de l'utilisation de l'espace de configuration en mécanique ondulatoire à partir d'ondes se propageant dans l'espace réel. Toutefois, cette méthode est limitée puisque, comme le remarque de Broglie, elle est seulement valable pour les systèmes composés de deux particules et en l'absence de champ extérieur.

3.3.3 | Contre la non-localité

La possibilité d'une description des phénomènes quantiques dans l'espace réel se heurte à de nombreuses difficultés théoriques. Elles se révèleront d'ailleurs insurmontables, puisque directement liées à la non-localité intrinsèque de la théorie dont les physiciens n'ont pas encore pleinement conscience. L'ironie de l'histoire est que Vigier considère l'ICMQ comme un remède contre la non-localité de l'ISMQ à laquelle seuls les positivistes peuvent s'accommoder.

Dans sa discussion de la mesure au dernier chapitre de sa thèse, Vigier reproduit un schéma d'une expérience de pensée imaginée par Schrödinger (voir figure la 3.8), version simplifiée du paradoxe EPR,[60] qui vise à mettre en lumière le problème de l'action à distance induite par l'ISMQ. Le principe de l'expérience est assez simple. Deux

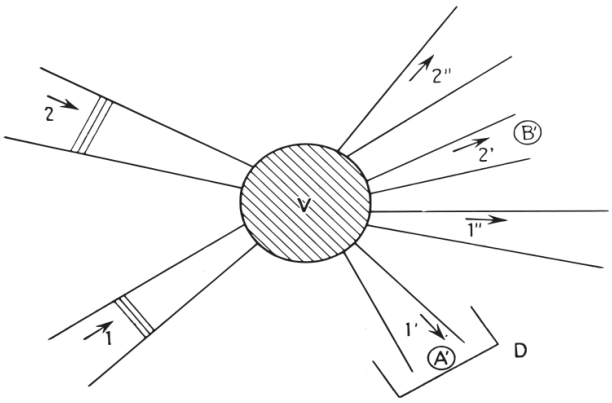


Fig. 3.8: Expérience de type EPR illustrant le « problème» de la non-localité.[61]

60. Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen, «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete ?», *Phys. Rev.* 47 (1935) : 777-780.

particules différentes numérotées 1 et 2 sur le schéma interagissent dans une région V de telle sorte qu'il soit possible de lier deux à deux les directions des particules réfractées, calculables à l'avance (1′ et 2′, 1″ et 2″, etc.). Ainsi, si un détecteur *D* placé en A' détecte la présence de la particule 1, alors la particule 2 se trouve à coup sûr en B'. Dans l'ISMQ, c'est la détection de la première particule qui fixe immédiatement l'état de la seconde, et cela, quel que soit leur éloignement. Une action à distance qui n'est pas admissible pour Vigier :

> C'est là de la « magie» pour reprendre l'expression de Schrödinger, car cela implique, si l'on suppose l'existence réelle des particules hors de l'observateur, l'existence d'actions physiques d'un type nouveau, inconnu jusqu'ici dans la Nature, et d'ailleurs contraires aux idées relativistes.[62]

Dans le présent exemple, Vigier argue qu'en dotant les particules de trajectoires, le problème s'évanouit. Les parcours individuels des particules sont alors le produit des seules interactions qui ont lieu dans la zone V, sans que l'appareil de détection de la particule 1 joue un quelconque rôle pour le destin de la particule 2.

Remarquons qu'au contraire de Vigier et de Broglie, Bohm n'est pas heurté par la non-localité des variables cachées. Lorsqu'il traite les systèmes à *N* particules, il mentionne cette « force à plusieurs corps» (*many-body force*)[63] qui est dépendante de la position de toutes les particules du système, mais n'y décèle pas pour autant un problème. Au contraire, il mobilise cette propriété de la force quantique afin de résoudre le paradoxe EPR sur la base des variables cachées.[64] Le commentaire de Vigier relatif aux tentatives échouées de son maitre soulève une certaine ironie de l'histoire :

> Il se pourrait que dans certains cas réels il ne soit pas légitime de passer par l'intermédiaire de l'espace de configuration pour décrire le comportement du système envisage. Il serait alors nécessaire de résoudre un système d'équations simultanées dans l'espace-temps réel au lieu de partir de l'équation de Schrödinger dans l'espace de configuration. L'emploi de l'espace de configuration serait alors moins général que notre modèle.[65]

En effet, c'est précisément l'inverse qui se montrera vrai et qui permettra d'ailleurs à la théorie causale de rendre compte des phénomènes d'intrication. Contrairement à ce qu'espérait de Broglie, la décomposition du potentiel quantique en la somme de termes dépendants seulement des coordonnées de chaque particule est généralement

61. Jean-Pierre Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta* (Paris : Gauthier-Villars, 1956), 166.
62. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 166.
63. Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 1», 175.
64. Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 2», 186–187.
65. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 142–143.

impossible, notamment pour les particules intriquées. En langage mathématique, cela se traduit par une fonction d'onde qui n'est pas factorisable.[66]

3.4 L'interprétation causale et la relativité générale

Le dernier aspect théorique abordé dans ce chapitre concerne le lien que Vigier effectue entre la théorie de la double solution et la relativité généralisée qui est l'objet du troisième chapitre de sa thèse de doctorat. Le projet d'unifier gravitation et quanta est ambitieux et Vigier n'est évidemment pas en capacité de proposer une théorie unitaire aboutie. Il s'agit d'ailleurs de la partie la moins approfondie de son travail alors qu'il est paradoxalement à l'origine de son intérêt pour la théorie de de Broglie. Plus de la moitié du chapitre consiste en effet en une synthèse générale des conceptions d'Einstein en théorie unitaire.

3.4.1 Une tentative d'unification de la gravitation et des quanta

Bien que dès le début de Broglie positionne ses travaux dans un cadre exclusivement relativiste, l'unification entre gravitation et quanta ne figure absolument pas dans son dessein originel. Vigier développe cette idée à partir d'une analogie conceptuelle existante entre la double solution et un mémoire de Georges Darmois[67] ainsi qu'un article d'Einstein et de son assistant Jakob Grommer.[68] Il remarque que tous ces auteurs assimilent les particules matérielles à des singularités du champ et que ces dernières sont astreintes à suivre ses lignes de courant en mécanique quantique, ou géodésiques en relativité. Vigier imagine à partir de cette analogie qu'une unification entre ces théories pourrait être envisageable. L'hypothèse de Vigier est donc purement spéculative et ne repose pour ainsi dire sur aucun fondement mathématique.

En outre, Vigier semble ignorer qu'à l'origine l'introduction des singularités en relativité générale, ce que Vigier qualifie de seconde version de la relativité générale, constitue pour Einstein avant toute autre chose un constat d'échec. En 1915, Einstein envisage sa théorie de la relativité généralisée comme le point de départ d'une théorie de la gravitation et de l'électromagnétisme. À l'époque, aucune particule neutre ne figure parmi les particules élémentaires et il parait normal pour Einstein d'adjoindre

66. Une fonction d'onde factorisable pour un système composé de deux particules peut s'écrire sous la forme $\Psi(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}) = \psi_1(\boldsymbol{x_1})\psi_2(\boldsymbol{x_2})$ David Bohm et Basil J. Hiley, «On the intuitive understanding of nonlocality as implied by quantum theory», *Foundations of Physics* 5, n° 1 (1975) : 97–101.

67. Georges Darmois, *Les équations de la gravitation einsteinienne* (Paris : Gauthier-Villars, 1927).

68. Albert Einstein et Jacob Grommer, «Allgemeine Relativitätstheorie und Bewegungsgesetz», *Verlag der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1927, 2-13.

l'interaction électromagnétique à la gravitation.[69] Après avoir tenté pendant des années de décrire les mouvements des particules dans une théorie des champs à l'aide de fonctions purement continues, il envisage en 1927, avec Grommer, la possibilité d'introduire de la discontinuité dans la théorie. Grommer note en effet que, dans le cas gravitationnel pur ou en ajoutant une composante électromagnétique, les équations possèdent toutes une solution à symétrie sphérique en $1/r$. Avec l'aide de cette nouvelle hypothèse, Einstein et Grommer montrent que pour le champ gravitationnel, les équations du mouvement d'une singularité sont complètement déterminées et coïncident avec les géodésiques.[70] L'introduction de discontinuités est toutefois loin d'être naturelle pour Einstein. Jammer rappelle que si Einstein rejette en 1922 les solutions de Friedmann, c'est en partie à cause de l'existence d'une singularité au sein du continuum espace-temps.[71] À la lumière de cette remarque, il parait nécessaire de nuancer la portée du rapprochement conceptuel opérée par Vigier entre la théorie de la double solution de 1927 et cette seconde version de la relativité d'Einstein.

Vigier emprunte à Darmois l'idée que les particules se déplacent dans un tube d'univers. Ce tube d'univers permet de distinguer le champ intérieur dans lequel la particule est localisée du champ extérieur où la matière est absente :

> La conception qu'Einstein propose de substituer à celle de Newton, au lieu de lier les masses entre elles par des forces, les relie par la communauté du champ dans lequel elles sont toutes intégrées. Les tubes d'univers qui décrivent le mouvement des masses matérielles baignent, si l'on peut dire, dans le même champ, et c'est lui qui crée leur interdépendance. Mais pour y parvenir, il faut d'abord préciser la façon dont le tube d'univers se raccorde à l'extérieur, la dépendance de la masse et du champ.[72]

Dans son traitement du problème, Darmois scinde donc l'équation du champ de Einstein en deux. La première concerne le cas intérieur et correspond à l'équation d'Einstein habituelle :

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} R = -kT_{\alpha\beta} \tag{3.31}$$

Ici, $R_{\alpha\beta}$ est le tenseur de Ricci qui s'interprète comme la courbure de l'espace-temps. Il est relié à la quantité R, le scalaire de Ricci, et la métrique $g_{\alpha\beta}$ par $R = g^{\alpha\beta} R_{\alpha\beta}$. Le terme de droite comporte le tenseur énergie-impulsion $T_{\alpha\beta}$ ainsi que la constante d'Einstein $k = \frac{8\pi G}{c^4}$. Dans le cas extérieur, c'est-à-dire en l'absence de matière, le terme de droite est identiquement nul et l'équation se réduit à :

69. La découverte du neutron est attribuée à James Chadwick en 1932. L'idée de l'existence d'une particule neutre est antérieure, Ernest Rutherford l'introduit dans son modèle atomique en 1920, mais il est une association proton-électron. Pais, *Inward Bound*, 397–402.
70. Jagdish Mehra, *The Golden Age of Theoretical Physics* (Singapour : World Scientific, 2001), 997–998.
71. Max Jammer, *Einstein and Religion* (Princeton, NJ : Princeton University Press, 1999), 241.
72. Darmois, *Les équations de la gravitation einsteinienne*, 44.

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} R = 0 \tag{3.32}$$

L'équation dresse ainsi un pont entre la distribution de matière et d'énergie donnée par le tenseur énergie impulsion et la géométrie de l'espace-temps. En l'absence de matière, la métrique est celle pseudo-euclidienne de Minkowski. Dans le cas intérieur, la présence de matière déforme l'espace-temps et des singularités apparaissent comme celle du type de Schwarzschild. La résolution du problème consiste en grande partie à trouver la connexion entre le cas intérieur et extérieur. Vigier adapte cette représentation dans le cadre de la théorie de la double solution qui, comme expliqué plus haut, consiste à écrire la solution u comme la somme d'un champ à singularité u_0 et d'un champ continu φ.

À l'évidence, Vigier ne peut pas fournir de solution à ce problème que d'aucuns qualifieraient d'insoluble. Les obstacles sont nombreux, en premier lieu l'absence de théorie unitaire bien établie. Il rappelle que la résolution de l'équation d'Einstein nécessite, d'une part, de choisir une métrique qui fournit la géométrie de l'espace-temps parmi l'infinité des choix possibles, et d'autre part, de définir géométriquement les tenseurs correspondant aux différents champs (électromagnétique, gravifique et quantique). La première condition se résout mathématiquement tandis que la seconde ne peut, précise-t-il, que s'appuyer sur des données expérimentales qui sont malheureusement absentes. Comme il est impossible de déduire *a priori* ces formes géométriques, Vigier renverse le problème et propose de partir des cas les plus généraux, qui ne présupposent pas des formes géométriques spécifiques des interactions, et de déterminer si ces conditions générales ne déboucheraient pas sur des propriétés vérifiables expérimentalement. De ce point de vue, il envisage les trajectoires de la double solution comme un « mode de contrôle» supplémentaire permettant de mieux encadrer le problème en fournissant des restrictions supplémentaires sur les solutions.

Le programme de Vigier, sur le long terme, consiste dès lors à « fondre» la fonction u de de Broglie, solution des équations de la mécanique quantique, dans le champ de la relativité générale. Mathématiquement, cela équivaut à trouver une fonction u qui est à la fois solution de l'équation d'Einstein et dont la trajectoire coïncide avec celle de la théorie de la double solution. Toutefois, comme le confesse Vigier, les prétentions de l'ICMQ pour unifier la gravitation et les quanta sont, dans l'état actuel des choses, fortement limitées. Dans sa thèse, Vigier se restreint à la démonstration de la *possibilité* d'existence de solutions des équations du champ qui redonnent les trajectoires de l'ICMQ.[73]

Vigier pense avoir démontré que dans les cas de l'équation de Klein-Gordon et de Dirac, il existe effectivement des solutions qui satisfont les équations du champ et sont

73. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 70–71.

compatibles avec les trajectoires de la double solution. Cependant, la méthode semble à première vue suspecte. Pour arriver à ses fins, Vigier part systématiquement du cas extérieur en négligeant le cas intérieur, c'est-à-dire quand le tenseur énergie-impulsion $T_{\alpha\beta}$ est identiquement nul. Sa preuve consiste alors simplement à invoquer le théorème de guidage (voir la section 3.2.2 page 101) pour affirmer que si des solutions existent dans le cas extérieur, elles existent alors automatiquement dans le cas intérieur.[74]

3.4.2 Un abandon prématuré des travaux de Vigier en relativité

L'incursion de Vigier dans les théories unitaires s'arrête brusquement après la thèse ce qui est étonnant au premier abord. Aucune publication postérieure à 1954 n'est à recenser sur la thématique, y compris dans les *CRAS* dont il a pourtant un accès aisé par l'intermédiaire de de Broglie. Ceci est d'autant plus surprenant que la relativité constitue son point d'accroche de la théorie de de Broglie-Bohm et qu'il considère l'unification comme l'objectif final de l'ICMQ. Vigier ne se justifie nulle part sur cet état de fait. Ce silence sur la relativité générale n'est pas uniquement scientifique. Dans ses textes militants, jamais l'idée d'unifier gravitation et quanta ne figure dans les arguments en faveur de l'ICMQ (voir la section 8.3.1 page 270).

Dans cette entreprise, il obtient d'ailleurs immédiatement le soutien moral, à défaut de scientifique, de la part de de Broglie et de Bohm. De Broglie, qui affectionne les « grands» programmes de recherche, mentionne dès qu'il en a l'occasion cet horizon possible de la double solution qu'il considère comme une hypothèse heuristique. Bohm manifeste également un intérêt vis-à-vis de l'état d'avancement de la théorie, même s'il n'y contribue pas de sa propre personne. Il prévient le groupe français de l'embauche en 1952 d'un « nouvel assistant des U.S. qui souhaite travailler sur l'ICMQ. Il est expert de la relativité, et avec son aide, j'espère comprendre ce que toi et Vigier avez fait.»[75] Cette nouvelle recrue n'est autre que Ralph Schiller qui a poursuivi une thèse de doctorat sur la gravitation sous la direction de Peter Bergmann de l'université de Syracuse.[76] Bohm encourage d'ailleurs Vigier à publier rapidement les résultats obtenus dans sa thèse. Cependant, il ne peut pas publier ses résultats issus de sa thèse avant de l'avoir terminée et doit en conséquence reporter la rédaction de cet article.[77]

74. L'analyse des démonstrations de Vigier mériterait une plus grande attention. Malheureusement, la relativité générale sort de nos compétences et nous devons, avec regrets, nous contenter de cette analyse succincte.

75. Bohm, David Bohm à Évry Schatzman.

76. Freire Jr., *The Quantum Dissidents*, 43 ; Le « groupe de Syracuse» structuré autour de Bergmann s'occupait principalement pendant cette période de quantifier la gravitation en appliquant la procédure de quantification canonique inventée par Dirac. Ezra T. Newman, «A Biased and Personal Description of GR at Syracuse University, 1951–1961», *Einstein Studies* 11 (2011) : 373-383.

77. Schatzman, Évry Schatzman à David Bohm.

En l'état actuel de nos sources, il ne nous est pas possible de fournir une explication documentée de cet abandon. Nous pouvons formuler trois hypothèses possibles qui ne sont pas mutuellement exclusives. Nous ne connaissons pas les rapports de thèse, mais peut-être que le jury composé Darmois, Lichnerowicz et Tonnelat, tous des physiciens relativistes, n'ont pas accueilli les arguments avec le même enthousiasme que leur accorde son auteur. Un élément qui irait dans ce sens est que Vigier n'a, semble-t-il, jamais réellement collaboré avec Tonnelat qui, pourtant, travaille sur le même sujet à l'IHP. Dans ce scénario, Vigier aurait tout simplement abandonné faute de soutien. Une seconde hypothèse serait une question de priorité dans les recherches. Vigier est le seul physicien relativiste du groupe. Il est probable que face à des enjeux théoriques plus immédiats, notamment les questions de la représentation hydrodynamique et de la démonstration de la règle de Born (voir la section 5.1.1 page 152), aient pris le pas sur la perspective d'unification, qui s'inscrit sur le plus long terme. Enfin, une troisième hypothèse serait une perte d'intérêt pour la thématique en raison d'une rupture épistémologique. Bohm fournit un cadre épistémologique général à l'ICMQ dans lequel les théories sont imbriquées les unes dans les autres, ce qu'il dénomme des « niveaux d'organisation». Cette épistémologie, fondamentalement antiréductionniste, est contraire par principe à une théorie unitaire puisque chaque échelle d'organisation possède ses propres lois (voir la section 5.2 page 160).

En tout état de cause, l'unification de la gravitation et des quanta par le biais de l'ICMQ figure parmi la longue liste des programmes de recherche restés au stade embryonnaire.

3.5 Jean-Pierre Vigier, un style scientifique héritier de Louis de Broglie

Pour clore ce chapitre, nous proposons de caractériser le style scientifique de Vigier en nous appuyant sur l'examen de ses premiers travaux. Par style, nous désignons avec Gayon,[78] lui-même s'inspirant de Fleck,[79] un ensemble de techniques et de préférences intellectuelles qu'un chercheur ou un collectif définissent comme pertinentes. Gayon oppose ainsi le style à la méthode en cela qu'il est individuant et non reproductible, comme le sont, pour prendre des exemples d'en dehors du champ scientifique, le tour de main de l'artisan ou le coup de pinceau du peintre.

En raison de la limitation de nos sources, l'analyse est nécessairement contrainte et

78. Jean Gayon, «On the Uses of the Category of Style in the History of Science», *Philosophy and Rhetoric* 32, n° 3 (1999) : 13-25 ; À noter qu'il existe une version française antérieure de cet article : Jean Gayon, «De la catégorie de style en histoire des sciences», *Alliage* 26 (1996) : 13-25.

79. Ludwik Fleck, *Genèse et développement d'un fait scientifique*, trad. Nathalie Jas (1935 ; Paris : Les Belles Lettres, 2005).

ne saurait déboucher sur une illustration exhaustive de cette définition. Les archives personnelles de Vigier sont fragmentaires et, hormis quelques correspondances éclairantes, nos sources sont majoritairement constituées de documents publiés. Ces produits finis ne permettent pas de saisir l'activité scientifique dans sa dynamique, ses essais et ses erreurs. Pis, nous savons depuis Reichenbach et Salmon que le processus réel de pensée à l'œuvre dans l'acte de création scientifique peut être complètement différent de la reconstruction rationnelle de la science « finie », destinée à la communication et à l'évaluation par les pairs.[80] Une distinction que l'on retrouve également dans la sociologie de Bruno Latour, entre la « science faite » et la « science en train de se faire ».[81] Dans une perspective de reconstruction, l'accès aux carnets de laboratoire et autres notes personnelles nous auraient été une aide précieuse afin de saisir le quotidien de Vigier. Malheureusement, en leur absence, nous nous restreignons à une analyse statique.

Nous avons isolé trois traits que nous jugeons constitutifs du style de Vigier et qui, mis ensemble, singularisent sa démarche de physicien : le rôle prééminent de la réflexion philosophique dans le travail théorique, l'utilisation extensive des images en tant que représentations mentales et, enfin, une méthodologie que l'on peut caractérisée de rationaliste.

3.5.1 | Un physicien philosophe

La première caractéristique que nous avons souhaité valoriser dès le début de ce chapitre est évidemment la place primordiale qu'occupe la réflexion philosophique et épistémologique dans le travail scientifique de Vigier. Bien que cela n'apparaisse pas explicitement dans sa thèse, nous savons que Vigier se revendique du matérialisme dialectique et oriente ses recherches en physique théorique dans ce sens. Là où certains physiciens pourraient toutefois effectuer une claire distinction entre, d'une part, ce qui relèverait du travail scientifique dans le laboratoire et, d'autre part, de la réflexion philosophique sur les sciences, réservée à un cadre personnel ou militant, la question interprétative est à la source de sa démarche de physicien.

Ceci est immédiatement repérable dès l'introduction de sa thèse qui débute par une synthèse historique des interprétations de la physique. Cette histoire est certes

80. Hans Reichenbach, *Experience and Prediction : An Analysis of the Foundations and the Structure of Knowledge* (University of Chicago Press, 1938 ; Notre-Dame, IN : University of Notre Dame Press, 2006) ; Wesley C. Salmon, *Logic* (Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall, 1973).

81. Sans pour autant adhérer à l'ensemble des conclusions épistémologiques de Bruno Latour, nous souscrivons à la pertinence d'une démarche qui vise à expliciter la création scientifique en action. Parmi les nombreux travaux de Latour mettant en avant cette méthodologie, voir entre autres : Bruno Latour, *Pandora's Hope : Essays on the Reality of Science Studies* (Cambridge, MA : Harvard University Press, 1999) ; Sur le traitement de la trajectoire personnelle du scientifique, voir, à titre d'exemple, la riche étude de Frederic L. Holmes sur Lavoisier : Frederic L. Holmes, *Lavoisier and the Chemistry of Life : An exploration of Scientific Creativity* (Madison, WI : University of Wisconsin Press, 1985).

expéditive lorsqu'il résume deux siècles d'histoire de la pensée scientifique par l'affirmation que « pour les physiciens classiques, d'Isaac Newton à James Clerk Maxwell, la réalité physique extérieure existe indépendamment des observateurs »[82] qu'il oppose avec le même manque de précaution au positivisme du courant dominant de la mécanique quantique. Le point important ici est que Vigier nous indique que science et philosophie sont intimement liées et que toute théorie scientifique contient en son sein une charge philosophique, c'est-à-dire un ensemble de propositions implicites ou explicites sur la réalité.

Bien que l'intérêt pour les questions philosophiques et épistémologiques soit naturellement présent chez tous les acteurs de l'ICMQ (c'est après tout la raison d'être de cette interprétation que de contester le supposé positivisme de l'interprétation de Copenhague), elle se manifeste à des degrés divers et selon des modalités différentes dans leurs publications.

Pour prendre l'exemple d'un physicien communiste de la même génération et proche de Vigier, Francis Fer (1918–1987) distingue plus nettement ce qui relève de la publication académique, scientifique, des questions de nature philosophique. Nous appuyons notre propos sur la thèse d'ingénieur des mines de ce dernier, soutenue en 1956 et qui porte sur les solutions à singularité dans la théorie de la double solution. Le manuscrit se concentre exclusivement sur les aspects mathématiques et laisse volontairement les aspects interprétatifs de côté. Il l'annonce d'ailleurs dès les premières lignes de son introduction, qui, après avoir rappelé en deux courts paragraphes le « redoutable problème du choix » devant lequel la mécanique ondulatoire se trouve désormais, entre celui de l'ISMQ ou de l'ICMQ, précise :

> Nous n'en discuterons pas davantage les fondements philosophiques, bien que cette discussion ne manque pas d'intérêt : tout physicien (et même tout homme, pour peu qu'il pense) philosophe comme M. Jourdain faisait de la prose, et refuser de prendre conscience de cette réalité n'est pas la meilleure manière de se débarrasser de la mauvaise philosophie ; mais le but de ce travail est essentiellement scientifique, et, tenant pour acquis une fois pour toutes que la matière a ses lois qui se sont exercées bien avant la venue de l'homo sapiens, on cherchera seulement dans cette introduction à préciser le cheminement qui conduit des idées générales au développement mathématique.[83]

L'approche tranche nettement avec celle de Vigier. Pour autant, Fer ne se désintéresse pas des questions interprétatives. Il affirme à ce propos que tout le monde pratique la philosophie, consciemment ou non. Il exerce cependant cette faculté dans d'autres cadres, en particulier au PCF, où il mène un combat pugnace pour obtenir un soutien officiel du Parti envers l'ICMQ (voir la section 8.3.3 page 275).

82. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 2.
83. Fer, « Les solutions singulières des équations d'onde et la théorie de la double solution », 1.

3.5.2 | Un physicien à images

La seconde particularité de la physique pratiquée par Vigier est le rôle prééminent qu'elle accorde aux images. Le terme peut être pris dans un sens tout à fait littéral en raison des nombreuses illustrations qui parsèment l'ensemble du manuscrit de thèse,[84] mais nous y incluons également ce que l'on peut appeler les descriptions imagées qui ne sont pas des schémas. Ces images remplissent deux fonctions distinctes.

Ces images ont une première vocation didactique. Elles aident le lecteur à s'approprier les concepts de l'ICMQ en les rendant tangibles. C'est cette utilisation que l'on retrouve dans l'illustration de la dualité onde-corpuscule et de son interprétation dans le cadre de la double solution mise en évidence par l'expérience des fentes d'Young. On peut les rapprocher des images employées par de Broglie dans sa thèse de doctorat qui illustre le concept d'onde de phase accompagnant les particules par un plateau sur lequel sont fixés des oscillateurs identiques (voir la section 1.1.2 page 17).

Ces images ne doivent pas non plus être confondues avec les expériences de pensée, bien que Vigier emploie ces dernières à plusieurs reprises (nous avons mentionné les fentes d'Young et une expérience de type EPR). Les expériences de pensées servent à exhiber un paradoxe apparent de la théorie qui va être résolu par un pur processus cognitif, sans avoir besoin de recourir à une expérience réelle.[85] Sauf exception, les images chez Vigier ne jouent pas ce rôle.

Ces images ne se réduisent pas non plus en une fonction purement illustratrice afin d'aider le lecteur à saisir un propos principal. Nous arguons qu'elles possèdent également une ontologie. Elles correspondent dans une certaine mesure aux transcriptions des représentations mentales de Vigier de la réalité matérielle. Elles jouent un rôle essentiel dans le processus d'élaboration des concepts théoriques qui précède l'étape formelle. L'exemple le plus parlant est celui du rapprochement que Vigier opère entre la double solution et la relativité générale. Celui-ci découle directement de sa représentation de la matière, comme une singularité du champ dont il va tenter, dans un second temps, de trouver un formalisme mathématique adéquat. Il y a là une évidente part de métaphysique idéaliste dans l'approche de Vigier qui entre en contradiction avec la prétention réaliste de son discours.

Un autre exemple représentatif de cette utilisation des images concerne la modélisation des trajectoires des particules de spin 1/2 reproduit par la figure 3.9 et le texte qui l'accompagne :

84. Nous avons dénombré 25 figures sur un manuscrit comportant 190 pages au total, avec une particularité du chapitre III sur le lien entre la double solution et la relativité générale qui n'en contient aucune.

85. Sur les expériences de pensée, leur caractérisation et leur utilisation en science et en philosophie, de la Grèce antique à aujourd'hui, voir : Katerina Ierodiakonou et Sophie Roux, éds., *Thought Experiments in Methodological and Historical Contexts* (Leyde : Brill, 2011).

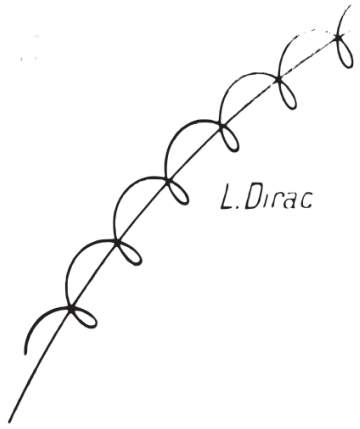


Fig. 3.9: Trajectoire hélicoïdale des particules à spin.[86]

> On voit alors que les trajectoires de Klein-Gordon qui correspondent aux relations de M.L. de Broglie $\frac{dx_j}{\partial_i S - \frac{e}{c} A_i} = \frac{dt}{\partial_t S - \frac{e}{c} A_4}$ servent de trajectoires moyennes aux trajectoires des particules à spin ; qui s'enroulent autour d'elles dans un mouvement hélicoïdal défini par les relations précédentes.
>
> Cet effet de précession qui fournit une représentation intuitive du tremblement de Schrödinger correspond aux effets de spin associés aux trajectoires relativistes de l'interprétation causale.[87]

Cette trajectoire décrivant une hélice autour d'un axe, qui correspond à la trajectoire moyenne ou de celle d'une particule sans spin, doit être considérée au sens propre. Il s'agit bel et bien pour Vigier de la « véritable » trajectoire suivie par la particule. Ce besoin de pouvoir raccrocher les phénomènes quantiques à des représentations classiques est une constante de l'ICMQ. Le spin est un cas extrême puisque c'est une observable d'origine purement quantique qui ne possède aucune contrepartie classique. La comparaison avec une rotation de la particule sur elle-même est d'ailleurs d'une portée limitée. Entre autres restrictions, la rotation nécessaire à l'électron de spin $\frac{1}{2}$ pour revenir à son état initial est de 4π d'après le groupe de symétrie $\mathrm{SU}(2)$, ce qui équivaut dans l'espace classique $\mathbb{R}^3$ à une rotation de deux tours complets. De plus, la vitesse de rotation à l'équateur, en prenant le rayon de l'électron égal à son rayon classique de $2,82.10^{15}$m, serait supérieure à celle de la lumière, en contradiction avec le principe de la relativité restreinte. Néanmoins, malgré toutes ces étrangetés quantiques, une description du spin dans l'espace tridimensionnel est proposée par les partisans de l'ICMQ comme nous le verrons au chapitre 6.

Enfin, comme dernier exemple, nous pouvons comparer les schémas de Vigier et de Halbwachs accompagnant la démonstration du théorème de guidage (cf. la figure 3.4 page 103) afin de souligner deux emplois bien différents des représentations ima-

86. Jean-Pierre Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta* (Paris : Gauthier-Villars, 1956), 39.
87. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 39.

gées. Le schéma de Halbwachs correspond à celui que l'on trouverait dans tout manuel de physique, Halbwachs est d'ailleurs professeur agrégé. La fonction du schéma est de traduire les données importantes pour la résolution du problème dans un langage visuel, une étape nécessaire et préalable à la mise en équation. Ces informations sont ici l'existence d'une surface close Σ représentée par un cercle en perspective (une ellipse) qui se déplace du point M à M' à la vitesse $\boldsymbol{v}$, ainsi que la vitesse $\boldsymbol{V}$ du fluide régulier. Halbwachs y représente également le vecteur normal $\boldsymbol{n}$ qui se révèle utile au cours des calculs. Le déplacement de la surface est clairement identifié par le cercle en pointillés. Le schéma de Vigier est quant à lui bien différent, tant sur sa forme que sa fonction. Vigier reporte aussi certaines des données employées dans la démonstration mathématique (surface S', déplacement $\mathrm{d}\xi$ selon le vecteur normal $\boldsymbol{n}$ pris au point P). Les sens et orientations des différents vecteurs utiles pour les projections ne sont pourtant pas présents. Par contre, Vigier prend la peine de dessiner une courbe entourant la surface S' qui n'est pas un cercle. Le choix de cette forme indique que la surface est quelconque, une information qui est précisée dans le texte. Cette information n'est ici d'aucune utilité pratique pour la mise en équation du problème puisque la forme de la surface n'entre pas comme paramètre. Chez Vigier, l'idée qu'il existe un fluide possédant une « bosse» enclose dans une surface est à prendre au sens littéral, d'où cette représentation d'une surface quelconque comme le serait une véritable bosse dans un fluide. Halbwachs, au contraire, définit la surface davantage selon des critères mathématiques, elle délimite un domaine dans lequel les phases et les amplitudes des ondes régulières et singulières sont égales.

3.5.3 | Un physicien rationaliste

Le dernier aspect du style de Vigier que nous voulons souligner est sa propension à s'élever au plus haut niveau de généralité possible pour ensuite redescendre, par un chemin déductif, au particulier. Nous avons pu constater qu'à plusieurs reprises, en l'absence de critère physique, Vigier n'hésite pas à monter en abstraction, espérant être en capacité de déduire, dans un second temps, des propriétés physiques qui permettront d'avancer dans la résolution du problème. Il procède ainsi lorsqu'il doit faire face à la détermination de l'équation non linéaire censée gouverner le mouvement de la singularité. Puisqu'en l'absence de données expérimentales Vigier est en prise avec une multitude de choix pour cette équation – ce qui, d'après l'expression de Lochak, revient à chercher une aiguille dans une meule de foin[88] – il précise qu'« il faut procéder par généralisation des théories existantes, en cherchant à déduire à chaque pas des conséquences expérimentales.»[89]

88. Lochak, *Louis de Broglie*, 220.
89. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 70.

Ainsi, la pensée de Vigier est caractérisée par un double mouvement, du particulier P vers le général G pour retourner ensuite vers un nouveau particulier P', que l'on peut schématiser par $P \to G \to P'$. Le premier mouvement $P \to G$ est celui qui laisse place à la spéculation physique puisque de nature inductive. C'est entre autres à partir de celui-ci qu'il effectue un rapprochement entre la double solution et la relativité générale, pour induire un modèle général dans lequel la matière serait une triple singularité graviphique, électromagnétique et quantique. Le second mouvement $G \to P'$, qui doit permettre à la théorie de dégager de nouvelles propriétés, se montre toutefois plus problématique. Si Vigier parvient à quelques résultats, comme sa démonstration du théorème du guidage de de Broglie à partir de ses hypothèses générales sur la fonction à singularité, ceux-ci se montrent limités. En particulier, il ne dégage aucune nouvelle propriété testable expérimentalement.

En comparaison, la démarche de Bohm est tout autre. Dans le premier article de 1952, il résout un ensemble de problèmes physiques particuliers, des cas d'école, telle la pénétration d'une barrière de potentiel par une particule chargée, plusieurs systèmes stationnaires ou encore la célèbre l'expérience de Franck-Hertz.[90] Il considère que le critère déterminant pour la viabilité de sa théorie est celui de l'équivalence empirique, qui se traduit en ce que chacune des observables particulières de la mécanique quantique trouve son équivalant dans la théorie des variables cachées. Le second article de Bohm, consacré à la mesure, exprime cette même volonté d'ancrer les variables cachées dans la réalité empirique.[91] Il y traite d'ailleurs spécifiquement de l'objection de Pauli en considérant la collision d'un électron avec un atome d'hydrogène. L'article se termine par quelques considérations sur une possible distinction de la théorie des variables cachées d'avec la mécanique quantique usuelle sur le plan observationnel. Bohm ne fournit aucun protocole détaillé, mais la simple existence de cette remarque finale indique tout de même que la préoccupation est présente. Ces éléments illustrent l'influence épistémologique sur Bohm de la tradition empiriste et pragmatique dominante aux États-Unis.[92]

Cette dimension empirique est absente des premiers travaux de Vigier. Les diverses références à l'expérience sont trop générales pour jouer un rôle quelconque dans ses raisonnements. Ainsi, nous sommes tentés de qualifier la physique de Vigier de rationaliste et d'anti-empiriste, qui contraste avec celle de Bohm d'inspiration pragmatique. Cette distinction, au demeurant schématique, doit se comprendre comme une certaine tendance, ou une coloration, de leurs modes de raisonnements respectifs. Vigier n'est pas un rationaliste pur jus, pas plus que Bohm n'est véritablement pragmatique. Tous deux se définissent d'ailleurs comme des marxistes dont la philosophie s'oppose à

90. Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 1 ».
91. Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 2 ».
92. Silvan S. Schweber, « The Empiricist Temper Regnant : Theoretical Physics in the United States 1920-1950 », *Hist. Stud. Nat. Sci.* 17, n° 1 (1986) : 55-98.

l'un et à l'autre des modes de pensées. L'intérêt de Bohm pour les fondements de la mécanique quantique est une démarche résolument anti-pragmatique puisqu'elle refuse d'accepter l'ISMQ sur la seule base de sa capacité prédictive. Chez Vigier, la propension à la spéculation est étrangère au rationalisme, ou euclidéanisme selon la terminologie employée par Lakatos, qui est fondamentalement « puritain et antispéculatif », au contraire de l'empirisme (ou semi-empirisme).[93] Nous voulions surtout souligner que dans ses raisonnements, Vigier tend à partir de certains concepts préscientifiques (continuité, absence de vide) pour tenter d'en déduire dans second temps des hypothèses physiques.

Ces différences de méthodologie entre Bohm et Vigier illustrent qu'au sein d'une même famille philosophique, dans le cas présent le marxisme, il peut exister des variations importantes qui ont un impact concret dans le travail du physicien. Il ne suffit donc pas de restreindre l'étude au premier ordre. De surcroît, ces variations sont intéressantes puisqu'elles reflètent des traditions de pensées issues de cadres nationaux, voire locaux, puisque liées à la pratique de recherche d'un laboratoire, en l'occurrence l'IHP.

3.5.4 | L'héritage de Louis de Broglie

Nous avons séparé ces trois grands traits de la physique de Vigier pour le besoin de l'analyse. Cependant, ils ne sont pas indépendants les uns des autres, mais forment au contraire un tout cohérent. Le réalisme philosophique, que l'on pourrait qualifier de métaphysique, s'accorde bien avec cette physique qui s'évertue à maintenir des représentations claires et intuitives des phénomènes physiques par l'emploi des images. Ce questionnement théorique qui favorise l'établissement de grands principes universellement valables coïncide avec un matérialisme d'essence réductionniste dont la perspective est d'unifier l'ensemble des interactions physiques.

Ces éléments du style de Vigier l'inscrivent résolument dans la tradition broglienne qui se caractérise elle aussi par une utilisation extensive des images et analogies, une propension à la spéculation, et cette quête des modèles généraux possédant une forte heuristique.[94] Ainsi, alors qu'à l'origine Vigier, avec Schatzman, se montrait plutôt réservé à l'idée de s'associer avec de Broglie, il s'avère qu'il s'est approprié le style de son maitre pour en devenir un véritable disciple. Ceci constitue le signe le plus manifeste d'une normalisation de leur relation et du début d'une véritable collaboration entre les deux hommes. Vigier tisse ainsi un lien entre Bohm et de Broglie, en partageant la

93. Imre Lakatos, *Philosophical Papers, Volume 2 : Mathematics, science and epistemology* (Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1978), 28–30 ; Cité dans : Helmut Pulte, «Jacobi's Criticism of Lagrange : The Changing Role of Mathematics in the Foundations of Classical Mechanics», *Historia Mathematica* 28 (1998) : 156–157.

94. Pour une étude approfondie du style de de Broglie, voir : Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960)», 86–107.

philosophie marxiste du premier et le style scientifique du second.

Chapitre 4

La représentation hydrodynamique de la mécanique quantique

Le groupe de physiciens français n'est pas le seul à manifester de l'intérêt pour les variables cachées de Bohm. Peu de temps après la parution des deux articles de Bohm dans *Physical Review*, le jeune physicien japonais Takehiko Takabayasi[1] s'empare à son tour du sujet. Takabayasi s'intéresse à l'utilisation des images classiques en mécanique quantique, en particulier à la représentation dite hydrodynamique de la mécanique quantique qui est proposée initialement par Erwin Madelung en 1926. Formellement proche des théories de l'onde pilote et des variables cachées, elle s'en éloigne cependant par son interprétation différente des équations.

Takabayasi est un protagoniste relativement absent de la plupart des travaux académiques sur la controverse autour de l'interprétation de la mécanique quantique et l'histoire de la physique japonaise en général, occulté par les grandes figures telles Hideki Yukawa, Soichi Sakata et Sin-itiro Tomonaga.[2] En ce qui concerne l'ICMQ, il va jouer un rôle de premier plan dans son orientation puisque Bohm et Vigier vont rapidement intégrer ses apports théoriques, en particulier son analyse du potentiel quantique comme un potentiel de pression. Ajoutons que Takabayasi, bien que ne partageant pas l'intégralité des positions de Bohm et Vigier, va devenir l'un de leurs collaborateurs. Sur invitation de de Broglie, il séjourne deux ans et demi à Paris, d'octobre 1956 à mai 1959, pour travailler sur la prise en compte du spin dans l'ICMQ à partir des

1. Également orthographié « Takabayashi ».

2. Les sources biographiques non japonaises sur Takabayasi sont fragmentaires. Les seuls articles recensés sont ceux de Hiroshi Ezawa et de Georges Lochak, publiés à l'occasion de son décès dans la revue *Historia scientiarum* de la société japonaise d'histoire des sciences. En sus, la majorité des écrits publiés de Takabayasi, notamment ceux en histoire des sciences, le sont en japonais sans qu'il existe de traduction. Il existe là une sérieuse lacune historiographique. Hiroshi Ezawa, « Takehiko Takabayashi (1919–1999) », *Hist. Sci.* 10, n° 3 (2001) : 286-304 ; Georges Lochak, « Quelques souvenirs d'un ami disparu : Dr. Takehiko Takabayashi (1919-1999) », *Hist. Sci.* 10, n° 2 (2000) : 211-212.

équations de Pauli et de Dirac (voir chapitre 6). Il sera également l'un des principaux artisans du modèle unitaire des particules discuté au chapitre 7.

Ce chapitre expose les premières contributions de Takabayasi sur les fondements de la mécanique quantique. Dans un premier temps, nous allons revenir sur les origines de la représentation hydrodynamique chez Madelung. Ensuite, nous aborderons les travaux de Takabayasi proprement dits, tant sur leurs aspects interprétatifs que théoriques. En particulier, nous étudierons l'extension des équations de Madelung à l'équation relativiste de Klein-Gordon.

4.1 La représentation hydrodynamique de la mécanique quantique par Erwin Madelung

La représentation hydrodynamique de la mécanique quantique est une idée originelle du physicien allemand d'Erwin Madelung, détenteur de la chaire de physique théorique de l'université de Francfort-sur-le-Main. En 1926, Madelung interprète la toute récente équation d'onde de Schrödinger pour un électron comme équivalente à l'équation d'un fluide irrotationnel constitué d'une distribution de charges identiques.[3] Madelung écrit la solution de l'équation de Schrödinger pour un électron sous sa forme polaire $\Psi = \sqrt{\rho}\,\mathrm{e}^{iS/\hbar}$, puis sépare les parties réelle et imaginaire pour obtenir ainsi un système de deux équations :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\boldsymbol{\nabla} S)^2}{2m} + V - \frac{\hbar^2}{2m}\frac{\Delta\sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}} = 0 \tag{4.1}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla}\cdot(\rho\boldsymbol{v}) = 0 \tag{4.2}$$

La similitude avec les modèles de de Broglie et de Bohm, tant dans la procédure que par la forme des équations, est frappante, mais l'interprétation de la première équation est cependant différente de ces derniers. Dans le cas présent, elle décrit la dynamique du fluide et non le mouvement d'une particule ponctuelle.

En prenant le gradient de la première équation, Madelung aboutit à une équation de Navier-Stokes (ou d'Euler puisque la viscosité est nulle) :

$$m\left(\frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{v}\cdot\boldsymbol{\nabla}\right)\cdot\boldsymbol{v} = m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = -\boldsymbol{\nabla}V + \boldsymbol{\nabla}\left(\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\Delta\sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}}\right) \tag{4.3}$$

3. Erwin Madelung, «Quantentheorie in hydrodynamischer Form», *Zeitschrift für Physik* 40 (1926) : 322-326.

Contrairement aux variables cachées, cette équation d'Euler ne fournit aucune information sur la position et la trajectoire de la particule.[4] La relation de Jacobi $\boldsymbol{v} = \frac{1}{m}\boldsymbol{\nabla} S$ reliant la vitesse à la phase exprime ici la vitesse locale du fluide en un point fixe (vitesse eulérienne) et non celle d'une particule que l'on suivrait (vitesse lagrangienne). L'avantage d'une telle description pour son auteur est qu'elle s'affranchit du « saut quantique» en représentant les phénomènes radiatifs par des transitions lentes vers un état non stationnaire. Cependant, des difficultés demeurent. Madelung concède que sur la base d'un tel modèle, les phénomènes d'absorption spontanée lui paraissent peu clairs. De plus, l'interaction entre les électrons dépend uniquement de la densité locale du fluide et de sa dérivée par l'intermédiaire d'un terme quantique (ce que Bohm dénomme plus tard le potentiel quantique), alors qu'il s'attend à ce qu'elle soit aussi fonction de la distribution totale des charges.[5]

Historiquement, le modèle de Madelung peut être considéré comme la première tentative de maintenir les concepts classiques en mécanique quantique. Madelung partage la conception de Schrödinger d'une matière purement continue. Il est, grâce à sa formation en ingénierie et en électrodynamique, familier avec l'hydrodynamique qui est, au XIXe siècle, le formalisme privilégié de la théorie de l'électricité. Dans son manuel de physique mathématique de 1922,[6] il souligne la nécessité d'être à l'aise dans les différentes disciplines afin d'apprendre à penser visuellement et physiquement. C'est cet aspect intuitif et imagé de la représentation hydrodynamique qu'il met volontiers en avant.[7] Cependant, à la différence de de Broglie et de Bohm, Madelung n'a aucune visée ontologique et il rejette d'ailleurs le réalisme philosophique en penchant assez nettement vers l'idéalisme :

> je peux dire, sans exagération que je n'ai pas le moindre intérêt dans le monde, mais seulement des images que j'en possède.[...] Par le langage une image du monde collective est créée en tant que convention.[8]

Madelung fait partie, pendant l'entre-deux-guerres, de ces physiciens allemands qui ont, selon l'expression de Paul Forman, capitulé face au « spenglerisme». Dans *le Dé-*

4. À propos de la genèse de l'hydrodynamique au XVIIIe siècle, voir : Olivier Darrigol, «Empirical Challenges and Concept Formation in the History of Hydrodynamics», *Centaurus* 50, nº 3 (2008) : 214-232.

5. Voir les références suivantes pour une explication détaillée de la théorie de Madelung : Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, 33–38 ; Robert E. Wyatt, *Quantum Dynamics with Trajectories : Introduction to Quantum Hydrodynamics* (New York City, NY : Springer, 2005), 42–48 ; Jagdish Mehra et Helmut Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 5 : Erwin Schrödinger and the Rise of Wave Mechanics. Part 2 : The creation of Wave Mechanics, Early Response and Applications 1925-1926* (New York City, NY : Springer Verlag, 1987), 855-858.

6. Erwin Madelung, *Die mathematischen Hilfsmittel des Physikers* (Berlin : Springer Verlag, 1922).

7. Deborah R. Coen, *Vienna in the Age of Uncertainty : Science, Liberalism, and Private Life* (Chicago, IL : University of Chicago Press, 2007), 193–194.

8. Paul Forman, «Weimar culture, causality, and quantum theory : adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile environment», *Hist. Stud. Nat. Sci.* 3 (1971) : 57. Note nº 133.

clin de l'Occident paru en 1918 et 1922, Oswald Spengler expose une théorie globale de l'histoire du monde. Il compare les différentes grandes cultures à des organismes vivants uniques et autonomes qui ne partagent en commun que leur cycle de vie, naissance, croissance puis déclin, dernière phase dans laquelle la culture occidentale serait désormais entrée en ce début de XXe siècle. Ses thèses déclinistes et pessimistes ont reçu un écho retentissant dans les milieux intellectuels allemand et autrichien après la défaite de 1918. À propos des arts et des sciences, Spengler prône un anti-universalisme radical. Ces domaines de l'activité humaine n'ont pas de signification absolue, mais sont, au contraire, des expressions particulières des différentes cultures. Ainsi, pour Spengler, il n'y a pas une science, mais des sciences, et les critères de vérité auxquels les scientifiques adhèrent ne sont, en réalité, que des illusions perpétrées par la culture occidentale.[9]

L'article de Madelung parait dans le *Zeitschrift für Physik* en décembre 1926, trois numéros après l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde proposée par Born.[10] À cette période, il passe relativement inaperçu. La mécanique quantique connait un développement extrêmement rapide et il n'y a guère la place pour les modèles à contre-courant, comme en témoigne l'onde pilote de de Broglie qui connait le même destin funeste un an plus tard. À ce propos, Broglie ignore vraisemblablement l'existence de la théorie hydrodynamique de Madelung en 1927 puisqu'il ne s'y réfère dans aucun de ses articles. Ceci ne serait pas étonnant outre mesure étant donné le peu de relations qu'il entretient avec les physiciens d'en dehors de la France. En dépit de quelques contributions avant et pendant la guerre,[11] la représentation hydrodynamique de la mécanique quantique ne suscite pas de réel intérêt. Bohm n'a pas non plus connaissance de la théorie de Madelung lorsqu'il met sur pieds sa théorie des variables cachées. Il ne la découvre qu'après que ses articles ont été acceptés pour publication. Il parvient alors à amender son premier article de justesse avant sa parution pour citer Madelung qu'il range aux côtés la théorie de de Broglie, parmi les tentatives trop rapidement abandonnées par leurs auteurs.[12] Le premier physicien qui s'intéresse sérieusement à la représentation hydrodynamique est le japonais Takabayasi, dans le sillon tracé par la théorie de Bohm, qui s'insère dans une réflexion plus générale sur l'utilisation des images classiques en mécanique quantique.

9. Forman, « Weimar culture, causality, and quantum theory : adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile environment », 30–37.

10. Max Born, « Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge », *Zeitschrift für Physik* 37, n° 12 (1926) : 863-867.

11. Entre autres celle de George Temple, « The physical interpretation of quantum mechanics », *Proc. Phys. Soc.* 41 (1928) : 60-82 ; et de Jacques Yvon, « L'équation de Dirac-Madelung », *JPR* 1 (1940) : 18-24.

12. Voir *Note added in proof* Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 1 », 167.

4.2 Takehiko Takabayasi : physicien, historien des sciences et poète

L'intérêt de Takabayasi pour les fondements de la mécanique quantique est intimement lié à son parcours. Né le 1er octobre 1919, Takabayasi est, à l'instar de nombreux physiciens de cette génération, marqué par la guerre. Après un cursus en physique démarré à Tokyo en 1939, il obtient un poste de professeur assistant à Nagoya dès janvier 1942. Sitôt arrivé à Nagoya, il est enrôlé dans un laboratoire de l'armée pour travailler sur les détecteurs infrarouges. Il retrouve son poste à Nagoya à la fin du conflit en 1945. Pendant l'effort de guerre, il prend conscience du retard accumulé de la physique japonaise par rapport à l'Europe et les États-Unis et il aimerait en comprendre les causes profondes. Il découvre alors que l'histoire des sciences est un outil pertinent dans cette recherche. Une histoire des sciences critique, puisque parmi ses lectures figure le marxiste britannique John Desmond Bernal, notamment son ouvrage classique *La Fonction sociale de la science*,[13] qu'il découvre par l'intermédiaire de Sakata, membre du Parti communiste japonais (Nihon Kyōsan-tō), qui travaille dans le même laboratoire que lui à Nagoya. Sa première contribution à l'histoire de la physique est un ouvrage sur la théorie de la chaleur,[14] publié par l'Association des scientifiques démocratiques (Minshushugi kagakusha kyôkai, souvent abrégée « Minka »), principale organisation des intellectuels marxistes japonais d'après-guerre, que l'on peut comparer à l'*Association of Scientific Workers* d'Angleterre ou à la *Federation of Atomic Scientists* américaine.[15]

Le marxisme exerce une puissante influence sur cette jeune génération d'intellectuels japonais. Il apparait pour ceux-ci comme la seule doctrine permettant une synthèse entre la théorie et la pratique et ainsi de penser le monde dans sa globalité.[16] En physique, Mitsuo Taketani et Soichi Sakata emploient la dialectique marxiste pour comprendre la crise en théorie quantique des champs dont la résolution nécessiterait une nouvelle révolution d'une ampleur équivalente à celle de la mécanique quantique en son temps.[17] La « théorie des trois étapes», proposée par Taketani en 1942, décrit l'évolution de notre compréhension de la nature selon un cycle continu. La première, l'étape phénoménologique, consiste en la simple description des phénomènes. La deuxième étape, substantialiste, est celle des découvertes des structures des objets.

13. John Desmond Bernal, *The Social Function of Science* (Londres : G. Routledge & Sons Limited, 1939 ; Londres : Faber & Faber, 2010).
14. Takehiko Takabayasi, *Netsugakushi* (Tokyo : Minshushugi kagakusha kyôkai, 1948 ; Tokyo : Kaimeisha, 1999).
15. Morris Low, *Science and the building of a New Japan* (New York City, NY : Palgrave Macmillan, 2005), 81.
16. Shigeki Uno, «La Modernisation politique au Japon et l'idée de subjectivité chez Maruyama Masao», *Ebisu* 32 (2004) : 70–71.
17. Shozo Motoyama, «Obituary. A Japanese Physicist in Brazil : Prof. Taketani (1911-2000)», *Hist. Sci.* 11, n° 1 (2001) : 119.

Enfin, l'étape essentialiste précise les interactions et les lois du mouvement des objets.[18] La crise théorique de la physique des hautes énergies face à la prolifération des nouvelles particules laisse entendre à Taketani que la physique est de nouveau entrée dans une période substantialiste, à l'instar de la physique nucléaire des années 1930. Sur la base de cette analyse, Sakata propose le « modèle de Nagoya » de physique des particules à la fin des années 1950 qu'il présente comme la nouvelle étape essentialiste.[19]

Au Japon, les marxistes ne sont pas les seuls à s'intéresser à l'interprétation de la mécanique quantique. En 1942, Yukawa, inspiré par Taketani et Sakata, mais dans une voie radicalement différente, explique l'échec des théories nucléaires par le manque de solidité des fondations de la théorie au regard de la covariance relativiste. Il plaide en faveur d'une issue révolutionnaire à la crise et pense qu'il est nécessaire de bouleverser la notion de causalité en physique. Il représente cette nouvelle perspective par une hypersurface dans l'espace à quatre dimensions constituée de quatre cercles, les *maru*, censée représenter la non-séparabilité entre causes et effets.[20] Tomonaga s'intéresse également au sujet, mais adopte une attitude plus conservatrice qui ne partage pas les vues révolutionnaires de Yukawa. Il se soucie particulièrement des questions pédagogiques relatives aux difficultés que rencontrent les étudiants dans leur compréhension des concepts quantiques. Il reproche aux enseignements de présenter une théorie déjà achevée et de trop se concentrer sur la résolution de problèmes numériques, alors que l'accent devrait au contraire être mis sur la science comme un processus historique. C'est dans ce but qu'il rédige son manuel *Quantum Mechanics*.[21] Ainsi, à la différence des États-Unis, la physique théorique japonaise des années 1940 est traversée par les débats sur les fondements de la théorie quantique.[22] Takabayasi ne fait pas figure d'ex-

18. Shoichi Sakata, « Taketani's "Three-Stage Theory" », *PTP Suppl.* 50 (1971) : 9-11.

19. À propos de la théorie des trois étapes et du rôle du matérialisme dialectique dans la physique japonaise, voir : Kent W. Staley, « Lost Origins of the Third Generation of Quarks : Theory, Philosophy, and Experiment », *Physics in Perspective* 3 (2001) : 215–218 ; Kent W. Staley, *The Evidence for the Top Quark : Objectivity and Bias in Collaborative Experimentation* (Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2011), 19–23.

20. Olivier Darrigol, « Elements of a Scientific Biography of Tomonaga Sin-itiro », *Hist. Sci.* 35 (1988) : 15–18 ; Schweber, *QED and the men who made it*, 260 ; Voir aussi le témoignage rétrospectif de Takabayasi : Takehiko Takabayasi, « Some characteristic aspects of early elementary particle theory in Japan », in *The birth of particle physics*, sous la dir. de Laurie M. Brown et Lillian Hoddeson (Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1987), 294-303.

21. Sin-itiro Tomonaga, *Quantum Mechanics. Volume 1 : Old Quantum Theory*, trad. Koshiba (Tozai-Shuppan, 1948 ; Amsterdam : North-Holland Company, 1962) ; Voir la recension élogieuse d'Uhlenbeck publiée dans *Science* à l'occasion de la première traduction anglaise de l'ouvrage : George E. Uhlenbeck, « Book Review - Quantum Theory : Quantum Mechanics. vol. 1, Old Quantum Theory. Sin-Itiro Tomonaga », *Science* 140, n° 3569 (1963) : 386.

22. Sur le développement de la physique au Japon, voir : Kenji Ito, « Values of "pure science" : Nishina Yoshio's wartime discourse between nationalism and physics, 1940-1945 », *Hist. Stud. Nat. Sci.* 33, n° 1 (2002) : 61-86 ; Low, *Science and the building of a New Japan* ; Dong-Won Kim, « The emergence of theoretical physics in Japan : Japanese physics community between the two World Wars », *Annals of Science* 52, n° 4 (1995) : 383-402.

ception, imprégné d'un entourage marxiste et particulièrement impressionné par la personnalité et la profondeur de réflexion de Tomonaga. Il se tourne assez naturellement et rapidement vers le sujet au cours de sa carrière. Ses premières réflexions sur la dualité onde-corpuscule, qui reprennent le concept de *wavicle* de Tomonaga et d'Eddington suggérant que les particules quantiques sont plus que la réunion de ces deux aspects pris séparément, sont publiées dans la revue de vulgarisation assez technique *Shinzen* ainsi que dans le journal militant *Shizen-Kagaku* de la Minka.[23]

Fig. 4.1: Professeur Takehiko Takabayasi, non daté.[24]

Enfin, une biographie de Takabayasi, aussi succincte soit-elle, ne peut faire l'impasse sur l'homme de lettres. Passionné de littérature européenne depuis ses années de lycée à Tokyo, il lit Goethe, Pouchkine, Baudelaire et Valéry dans leurs langues d'ori-

23. Ces articles n'ayant jamais été traduits du japonais, nous n'avons pas pu, pour d'évidentes raisons linguistiques, les intégrer dans notre analyse à de l'interprétation de la mécanique quantique par Takabayasi. C'est un manque certain qui limite *de facto* la portée de notre analyse.

24. Hiroshi Ezawa, «Takehiko Takabayashi (1919–1999)», *Hist. Sci.* 10, n° 3 (2001) : 287.

gines, et s'adonne à la poésie depuis l'université (un recueil posthume a été publié en 2000).

4.2.1 L'interprétation de la mécanique quantique selon Takehiko Takabayasi

En 1952 et 1953, Takabayasi signe deux articles dans la revue japonaise *Progress of Theoretical Physics* (*PTP*) qui vont établir les fondements de son interprétation des quanta, en particulier du statut qu'il accorde aux représentations classiques de la théorie.[25] Dans une première partie, l'auteur expose ses critiques sur les variables cachées de David Bohm, tant sur le plan épistémologique que physique. À partir de celles-ci, il va proposer, dans un second temps, une formulation alternative des variables cachées fondée sur la représentation hydrodynamique qu'il considère être la plus satisfaisante parmi les interprétations qui s'appuient sur des représentations classiques.

En effet, Takabayasi se montre plutôt critique envers les tentatives de maintenir des images classiques en mécanique quantique. Le premier article de 1952 commence d'ailleurs par un long commentaire sur la récente théorie de Bohm :

> Ses tentatives de mener la théorie vers une restauration de quelques images classiques nous semblent en opposition avec les probables lignes de développement de la théorie. L'idée de variables cachées peut être assez intéressante dans un certain sens, mais elles ne sont pas nécessairement des représentations de concepts classiques tels que repris par Bohm.[26]

Takabayasi ne rejette pas pour autant tout emprunt des concepts classiques en mécanique quantique. Il leur trouve même une certaine pertinence. Par contre, au contraire de Bohm, il refuse de leur accorder une quelconque ontologie :

> En conclusion, nous pouvons certainement considérer notre formulation de la mécanique quantique comme possible dans son champ d'application limité ; mais nous ne devrions pas prendre l'image associée à cette formulation (c'est-à-dire le mouvement classiquement défini et le potentiel supplémentaire) comme littéralement *réelle* ni la prendre comme fondamentale ; à la place, nous devrions plutôt la considérer comme un *medium*

25. Takehiko Takabayasi, «On the Formulation of Quantum Mechanics associated with Classical Pictures», *PTP* 8 (2 1952) : 143-182 ; Takehiko Takabayasi, «Remarks on the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures and on Relations between Linear Scalar Fields and Hydrodynamical Fields», *PTP* 9 (3 1953) : 187-222.

26. « His attempts to lead the theory so as to restore some classical picture seem to us in contrary to the probable lines of developments of theory. The idea of hidden variables may be rather interesting in some sense, nevertheless they might not necessarily be representatives of classical concepts such as taken up by Bohm.» Takabayasi, « On the Formulation of Quantum Mechanics associated with Classical Pictures», 144.

> pour dériver, à travers cette formulation, le changement d'état mécanico-quantique plus fondamental, dans un sens assez semblable à celui des chemins dans la formulation de Feynman. En général, il faut distinguer soigneusement la *formulation* et l' *interprétation* de celle-ci. Ainsi, en dépit des difficultés dans son interprétation, il faut sans hésitation être capable de traiter différents problèmes (équation de mouvement et problèmes d'état stationnaire) avec cette formulation en utilisant cette image.[27]

La formulation bohmienne de la mécanique quantique trouve ainsi son utilité à des fins calculatoires. À l'instar des chemins de Feynman, les trajectoires de Bohm permettent de traiter plus aisément certains problèmes physiques, mais ce n'est pas pour autant qu'elles doivent être considérées comme réelles comme le pense abusivement Bohm. Selon Takabayasi, elles remplissent la fonction de *medium* qui aide à cerner la transition entre les mécaniques classique et quantique. C'est ici que réside son principal mérite selon Takabayasi, aider à comprendre ce qui constitue la singularité de la mécanique quantique.

Toutefois, Takabayasi considère que la théorie des variables cachées de Bohm n'est qu'une des différentes formulations possibles de la mécanique quantique qui sont sur le plan prédictif toutes parfaitement équivalentes entre elles. Elle n'est donc pas intrinsèquement supérieure à la formulation par les intégrales de chemins de Feynman ou à la représentation matricielle de Heisenberg. Cette claire distinction qu'il effectue entre, d'un côté, les différentes formulations de la mécanique quantique et, de l'autre, leur interprétation le distancie du réalisme des partisans de l'ICMQ. Ces différentes formulations équivalentes de la théorie quantique sont autant de prismes nécessaires par lesquels le monde quantique doit se regarder et dont la mise en commun permet de mieux appréhender la réalité.

Bohm et Vigier défendent au contraire un réalisme des entités théoriques qui justifie l'existence *a priori* de trajectoires, quand bien même celles-ci ne sont pas observables. Dans l'ICMQ, l'existence des trajectoires est en effet une conséquence de l'évolution déterministe dans l'espace-temps. Dans un article en réponse publié dans la même revue *PTP*, Bohm rétorque à Takabayasi que le succès de la mécanique quantique n'est pas la conséquence des rejets de la causalité et du déterminisme. Il considère que ce succès s'explique par des éléments théoriques, en premier lieu les équations de Schrödinger et de Dirac auxquelles est ajoutée la règle probabiliste de Born. Or, remarque

27. « Conclusively, we can surely regard our formulation of quantum mechanics as a possible one in its limited range of applicability ; but we should not take the picture associated with this formulation (i.e. classically defined motion and extra potential) as literally *real* nor take it as so essential ; instead, we should rather consider it as a *medium* to derive, through this formulation, the more essential quantum-mechanical change of state, in a rather similar sense to the path picture in Feynman's formulation. In general one should carefully distinguish the *formulation* and the *interpretation* thereof. Thus in spite of the difficulties in its interpretation, one must be able to treat various problems (equation of motion and stationary state problems) on this fotmulation with no hesitation in utilizing the picture.» ibid., 145.

Bohm, ces éléments théoriques sont indépendants d'une quelconque interprétation, comme le prouve leur emploi dans les théories de l'onde pilote et la sienne.[28] Il n'y avait, selon Bohm, aucune nécessité d'abandonner la causalité. Cet abandon est un parti pris épistémologique, celui de ne conserver dans le formalisme que les quantités observables. En outre, cette posture épistémologique va, d'après Bohm, à l'encontre même de la démarche scientifique puisqu'elle prive, sans aucune autre forme de justification, la découverte d'éventuelles nouvelles propriétés inconnues jusque-là. Or, pour Bohm, la spéculation est consubstantielle au processus d'élaboration et de développement des théories physiques, comme ce fut le cas pour l'hypothèse atomiste du milieu du XIXe siècle qui elle aussi introduisait à sa manière des « variables cachées », dans le sens que les atomes n'étaient pas observables. S'il ne l'affirme pas aussi explicitement, la conclusion logique du raisonnement de Bohm est que la victoire de l'ISMQ, si elle n'est pas une nécessité scientifique, est alors de l'ordre de la contingence historique.[29]

Takabayasi conteste cette l'analogie avec l'hypothèse atomiste souvent employée par Bohm pour contrer le procès en métaphysique qui lui est intenté. Takabayasi remarque que la signification des variables cachée est fort différente dans l'un et l'autre des cas. Alors que la théorie atomique ajoute de nouvelles entités physiques apportant leurs propres degrés de liberté et leurs constantes comme la masse, la charge élémentaire, la théorie de Bohm n'ajoute aucune nouvelle constante. Fondamentalement, l'ICMQ ne fait qu'altérer le concept de mouvement de la théorie en substituant aux q-nombres (les opérateurs) des c-nombres (les nombres classiques).[30] La réponse de Bohm, peu convaincante, souligne qu'il n'y a pas d'altération de concept puisque l'ISMQ se refuse à étudier le mouvement des particules, terme qu'elle récuse par ailleurs. L'ICMQ ajoute donc bel et bien un nouveau concept à la théorie quantique, celle de mouvement des particules.[31]

Takabayasi formule aussi quelques critiques de nature physique envers les variables cachées. Il argumente que la méthode employée par Bohm montre rapidement ses limites. Elle est possible pour tous les couples d'observables qui sont des variables conjuguées (position-moment, moment angulaire-orientation, champ électrique-polarisation, etc.), mais dans le cas du spin, observable purement quantique qui ne possède pas un tel couple, la procédure de Bohm ne peut pas être appliquée.

28. David Bohm, « Comments on an Article of Takabayasi concerning the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures », *PTP* 9, n° 3 (1953) : 283–284.

29. La thèse de la contingence historique comme principal facteur pour expliquer la défaite de la causalité et la victoire de l'interprétation de Copenhague est défendue par le philosophe James T. Cushing. Cushing, *Quantum Mechanics* ; James T. Cushing, *Philosophical Concepts in Physics : The Historical Relation between Philosophy and Scientific Theories* (Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1998), 286–289.

30. Takabayasi, « On the Formulation of Quantum Mechanics associated with Classical Pictures », 160.

31. Bohm, « Comments on an Article of Takabayasi concerning the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures », 281–283.

Ainsi, la représentation classique des phénomènes quantiques semble restreinte aux cas des bosons en excluant les fermions.[32] Aussi, doter le champ quantique Ψ d'une réalité physique au même titre que le champ électromagnétique parait peu justifiable aux yeux du physicien japonais pour deux principales raisons. D'une part, à cause de sa définition dans l'espace de configuration dans le cas des systèmes à plusieurs particules, d'autre part parce que l'amplitude du champ quantique en tant que telle ne possède pas de signification physique.[33] Bohm répond avec des arguments *ad hoc* que ces deux objections ne sont pas cruciales. D'une part, la mécanique quantique étant un domaine de la connaissance fort différant de la physique classique, il n'est pas étonnant outre mesure que les entités physiques ne se comportent pas tout à fait comme en mécanique classique. D'autre part, les auteurs n'ont pas la prétention de présenter une théorie achevée.

À certains égards, la démarche du physicien japonais s'apparente à celle du brésilien Mário Schönberg,[34] collègue de Bohm à l'USP, qui s'intéresse lui aussi au modèle hydrodynamique sans pour autant plaider pour un retour à une description classique des phénomènes quantiques. Entre autres, Schönberg a montré que les trajectoires de l'interprétation de Bohm correspondent à celles moyennes d'un fluide soumis à de violentes fluctuations.[35] Sa motivation est d'étudier les différents modèles de la mécanique quantique afin de mieux en comprendre les fondements, ce qui a laissé croire à Bohm un possible soutien de la part du brésilien[36] avant que ses espoirs ne soient rapidement douchés et qu'il constate que Schönberg est en réalité « 100 pour cent contre l'ICMQ, spécialement contre l'idée d'essayer de former une image conceptuelle de ce qui se passe.»[37] L'exemple de Schönberg est également intéressant en cela qu'il est lui aussi marxiste, dirigeant du Parti communiste brésilien et député de l'état de São

32. Takabayasi, « On the Formulation of Quantum Mechanics associated with Classical Pictures», 165–167.

33. Seule une relation impliquant le rapport des amplitudes joue un rôle dans l'expression du potentiel quantique, la fonction Ψ peut donc être normalisée pour être identique à sa valeur dans l'ISMQ.

34. Également orthographié « Schenberg».

35. Mário Schönberg, «On the Hydrodynamical Model of the Quantum Mechanics», *Nuovo Cimento* XII, n° 1 (1954) : 103-133.

36. David Bohm, David Bohm à Évry Schatzman, 22 décembre 1953, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

37. David Bohm, David Bohm à Miriam Yevick, 24 octobre 1953, The David Bohm Papers. Section C - Correspondence - Yevick, M.L. - C.116-C.126, Birkbeck Library, University of London, Londres, « Schönberg is 100 percent against the causal interpretation, especially against the idea of trying to form a conceptual image of what is happening. He believes that the true dialectical method is to seek a new form of mathematics, the more "subtle" the better, and try to solve the crisis in physics in this way. As for explaining chance in terms of causality, he believes this to be "reactionary" and "undialectical." He believes instead that the dialectical approach is to assume "pure chance" which may propagate from level to level, but which is never explained in any way, except in terms of itself.» Cité dans : Freire Jr., *The Quantum Dissidents*, 41.

Paulo.[38] Aux côtés de celles de Fock et Rosenfeld, son approche témoigne de la grande diversité interprétative de la mécanique quantique chez les physiciens marxistes. Bien que leurs points de vue divergent, Schönberg exerce une certaine influence sur Bohm. D'une part, cette idée de fluctuations violentes introduite par Schönberg est explicitement reprise et adaptée dans le contexte de l'ICMQ afin de démontrer la règle de Born (voir la section 5.1.1 page 152). D'autre part, Schönberg incite Bohm à étudier la dialectique de Hegel. En lisant la *Logique*,[39] Bohm prend alors conscience de l'importance du lien dialectique qui unit la contingence et la nécessité, ce qui l'amène à réviser sensiblement sa position sur la question du déterminisme en physique quantique.[40] De cette réflexion nait son célèbre ouvrage, *Causality and Chance in Modern Physics*.[41]

Il existe cependant une différence de taille entre les approches de Schönberg et Takabayasi vis-à-vis de l'ICMQ puisque ce dernier collaborera à partir de 1957 avec Vigier et Bohm, tout en maintenant ses distances avec les conclusions qu'il juge trop naïves et avec ce qu'il considère comme une trop grande dépendance au cartésianisme de la part du groupe Vigier-de Broglie. Il critique en effet cette tendance à systématiquement décomposer les propriétés des objets quantiques en une somme de mouvements simples, notamment en ramenant l'ensemble des propriétés quantiques à des degrés de liberté internes. Takabayasi formule cette critique lors de son voyage à Paris et vise spécifiquement Vigier et ses collaborateurs qui tentent alors d'établir une classification des particules élémentaires à partir de leurs mouvements de rotation internes (la discussion de ce modèle est l'objet du chapitre 7).[42] En dépit de toutes ses critiques, Takabayasi se place dans une démarche constructive qui favorise la pluralité scientifique et préconise d'aborder la théorie quantique sous divers angles. Lui-même critique de la complémentarité, cet examen sans concessions des tentatives de restaurer les images classiques en mécanique quantique lui sert de point de départ à sa propre recherche d'une alternative satisfaisante à la complémentarité. Dans cette perspective, la représentation hydrodynamique lui parait être une candidate plus cohérente que les variables cachées de Bohm.

38. Marcelo Moraes Guzzo et Norma Reggiani, «Mário Schenberg : Physicist, politician and art critic», in *The Second ICRANet César Lattes Meeting : Supernovae, Neutron Stars and Black Holes*, sous la dir. d'Ulisses Barres de Almeida et al., 1693 (Melville, NY : AIP Publishing, 2015).

39. Nous n'avons pu déterminer laquelle des trois versions, au demeurant fortes différentes les unes des autres, de la *Science de la Logique*, première partie de l'*Encyclopédie des sciences philosophiques*, de 1817, 1927 ou 1830, était accessible à Bohm. Pour une traduction française et annotée, voir : Georg Wilhelm Friedrich Hegel, *Encyclopédie des sciences philosophiques I : La science de la logique*, trad. Bernard Bourgeois (1830 ; Paris : Vrin, 1986).

40. Peat, *Infinite Potential*, 155–157.

41. David Bohm, *Causality and Chance in Modern Physics* (Londres : Routledge & Kegan Paul Ltd, 1957).

42. Ezawa, « Takehiko Takabayashi (1919–1999)», 295.

4.3 La représentation hydrodynamique de la mécanique quantique selon Takehiko Takabayasi

Après avoir discuté des principaux aspects de l'interprétation de la mécanique quantique selon Takabayasi et en particulier de son attitude vis-à-vis des interprétations conservant des représentations classiques, la section suivante présente les principaux aspects théoriques des deux articles de 1952 et 1953. Ceux-ci sont complémentaires l'un de l'autre, le second venant préciser et corriger certains aspects du premier. C'est également dans le second article que la formulation hydrodynamique de l'équation de Klein-Gordon est présentée sous sa forme la plus aboutie.

4.3.1 Le potentiel quantique comme potentiel de pression

L'un des principaux apports de Takabayasi au modèle hydrodynamique est sa représentation du potentiel quantique en tant que potentiel de pression, qui faisait défaut dans la première version proposée par Madelung de 1926 et dont il ne savait pas tellement comment interpréter ce terme d'origine quantique.

En mécanique des fluides classique, l'équation d'Euler d'un fluide de densité ρ et de pression interne p est :[43]

$$m\partial_t v^i + m\partial_k v^i v^k = -\partial_i V - \frac{1}{\rho}\partial_k(p\delta^{ik}) \tag{4.4}$$

Or, Takabayasi remarque que l'équation d'Euler du fluide de Madelung peut s'écrire sous une forme similaire :[44]

$$m\partial_t v^i + m\partial_k v^i v^k = -\partial_i V - \frac{1}{\rho}\partial_k \sigma^{ik} \tag{4.5}$$

43. Nous utilisons ici la notation tensorielle afin d'alléger les équations. Les composantes $i, j, k = 1, 2, 3$ sont les différentes composantes spatiales. Peter R. Holland, *The Quantum Theory of Motion : An Account of the De Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics* (Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1995), 120–122.

44. L'interprétation du potentiel quantique en tant que potentiel de pression est présentée dans le premier article de 1952, mais comporte quelques erreurs de calcul mineures, corrigées par l'auteur en 1953. Nous reprenons ici les valeurs corrigées. Takabayasi, « On the Formulation of Quantum Mechanics associated with Classical Pictures », 148–149 et 180 ; Takabayasi, « Remarks on the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures and on Relations between Linear Scalar Fields and Hydrodynamical Fields », 191.

Dans cette équation de mouvement, un nouveau tenseur apparait :

$$\sigma_{ik} = \frac{\hbar^2}{4m}\rho\partial_i\partial_k \log(\rho) \tag{4.6}$$

Takabayasi l'interprète comme la manifestation de tensions d'origine quantique à l'intérieur du fluide. La force quantique $\partial_k\sigma^{ik} = \partial_i(\frac{\hbar^2}{2m}\rho\partial_i\frac{\Delta\sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}})$ dérivée du tenseur de contrainte (*stress tensor*) est bien entendu strictement équivalente à la force dérivée du potentiel quantique de Bohm, puisqu'il s'agit uniquement d'une réécriture de cette dernière. Takabayasi en déduit ensuite la pression isostatique du fluide en employant la même formule que si σ avait été un tenseur de contraintes de Cauchy classique, soit :

$$p = -\frac{1}{3}\mathrm{Tr}(\sigma) = \frac{\hbar^2}{6m}((\boldsymbol{\nabla}\sqrt{\rho})^2 - \rho\Delta\rho) \tag{4.7}$$

Ainsi, Takabayasi peut interpréter le système quantique comme analogue à un fluide classique pour lequel le potentiel de pression $(p\delta^{ik})$ serait remplacé par un potentiel de pression quantique $\frac{1}{\rho}\sigma^{ik}$. Cependant, à l'instar de l'introduction du potentiel quantique dans la formulation newtonienne de Bohm en 1952, il s'agit avant tout d'une analogie formelle (voir la section 1.2.2 page 48). Le tenseur quantique de contraintes de Takabayasi n'est pas interprétable classiquement . D'une part, il est fonction des dérivées de la densité, mais, plus intrigant, l'expression de la pression par une différence entre deux termes l'autorise à être négative, comme si des particules enfermées dans une boîte tiraient les parois vers l'intérieur. Selon Takabayasi, ce genre d'étrangetés qui apparaissent lorsque l'on tente de formuler la théorie quantique à l'aide de concepts classiques est typiquement ce qui interdit de donner une valeur ontologique à ces représentations.

Du point de vue de Bohm et Vigier et de leur quête d'une description des phénomènes quantiques à l'aide d'images issues de la physique classique, ils préfèreront cette analogie à celle de la mécanique newtonienne des variables cachées. Ce sera d'ailleurs l'une des raisons qui vont les motiver à adopter l'hydrodynamique comme modèle fondamental de l'ICMQ.

4.3.2 La représentation hydrodynamique en présence d'un potentiel électromagnétique

Une autre amélioration apportée par Takabayasi par rapport à la théorie de Madelung est la généralisation de la représentation hydrodynamique en présence d'un potentiel électromagnétique (A, ϕ). La procédure de détermination de l'équation d'Euler est toujours la même : à partir de l'équation de Schrödinger qui prend ici la forme $\{\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{2m}(\frac{\hbar}{i}\boldsymbol{\nabla} - \frac{e}{c}A)^2 + e\phi\}\Psi = 0$ de solution $\Psi = R\,\mathrm{e}^{iS/\hbar}$, il sépare les parties réelles et

imaginaires qui fournissent ainsi les équations de Jacobi et de continuité :

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{2m}\left(\boldsymbol{\nabla} S - \frac{e}{c}\boldsymbol{A}\right)^2 + e\phi - \frac{\hbar^2}{2m}\frac{\Delta R}{R} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial t} + \operatorname{div}\left\{P\left(\boldsymbol{\nabla} S - \frac{e}{c}\boldsymbol{A}\right)/m\right\} = 0 \quad (P \equiv R^2) \end{cases} \tag{4.8}$$

La vitesse du flux est simplement donnée par la relation $\boldsymbol{v} = \frac{1}{m}(\boldsymbol{\nabla} S - \frac{e}{c}\boldsymbol{A})$. En prenant le gradient de la première équation, Takabayasi obtient l'équation d'Euler du fluide de Madelung (avec $\boldsymbol{E}$ et $\boldsymbol{H}$ les champs électrique et magnétique) :

$$m\left(\frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{v}\cdot\boldsymbol{\nabla}\right)\cdot\boldsymbol{v} = m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = e\left(\boldsymbol{E} + \frac{\boldsymbol{v}}{c}\times\boldsymbol{H}\right) + \boldsymbol{\nabla}\left(\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\Delta R}{R}\right) \tag{4.9}$$

La différence la plus notable est qu'en présence d'un champ électromagnétique le rotationnel du champ de vitesse est non nul et prend la valeur :

$$\boldsymbol{\nabla}\times\boldsymbol{v} = -\,e\boldsymbol{H}/mc \tag{4.10}$$

Ce mouvement de rotation, Takabayasi le qualifie toutefois de « quasi irrotationnel» puisqu'il dépend uniquement de la présence ou non d'un champ magnétique externe. Il distingue ce type de vorticité de celui des particules à spin qui confèrent au fluide un mouvement de rotation intrinsèque et permanent, donc y compris en l'absence d'un champ magnétique extérieur.

4.3.3 La quantification du fluide de Madelung

Takabayasi introduit alors ce qu'il considère être la « vraie» vorticité,[45] en quantifiant le fluide de Madelung par une technique similaire à celle employée par Landau en 1941 pour expliquer la superfluidité.[46] Pratiquement, cette quantification signifie d'imposer des relations de commutation entre les variables conjuguées v et $P = R^2$ des équations d'Euler et de continuité qui sont, d'après Landau :[47]

$$\begin{cases} \left[v(x), P(x')\right] = \frac{\hbar}{im}\nabla\delta(x-x') \\ \left[v_i(x), v_j(x')\right] = \frac{\hbar}{i}\delta(x-x')\frac{1}{P}(\boldsymbol{\nabla}\times\boldsymbol{v})_k \end{cases} \tag{4.11}$$

Suivant ces règles de commutation et en prenant comme hamiltonien :

$$H = \int\left(\frac{m}{2}\boldsymbol{v}P\boldsymbol{v} + PV + \frac{\hbar^2}{8m}(\boldsymbol{\nabla}P)^2P^{-1}\right)\mathrm{d}x \tag{4.12}$$

45. Takabayasi, « On the Formulation of Quantum Mechanics associated with Classical Pictures», 172–173.
46. Lev Landau, «Theory of the superfluidity of helium II», *Journal of Physics USSR* 5 (1941) : 71.
47. Avec par définition $[A, B] = AB - BA$

Les équations fondamentales du fluide (4.2) et (4.3) s'écrivent alors :[48]

$$\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} = \frac{i}{\hbar}[H, \boldsymbol{v}] \qquad \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{i}{\hbar}[H, P] \tag{4.13}$$

Avec cette quantification, l'état fondamental est donné par $\boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{v} = 0$, ce qui correspond à un fluide irrotationnel. Ensuite, les états excités sont ceux pour lesquels $\boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{v} \neq 0$. Quantification oblige, le passage d'un état à un autre est discontinu. Pour cette raison, Landau dénomme les excitations élémentaires du fluide les *rotons*, par analogie aux phonons qui sont les quasi-particules qui émanent des vibrations quantifiées des solides cristallins. Schönberg, qui utilise une méthode similaire en 1954, découvre que la quantification du fluide introduit des fluctuations donnant naissance à de violentes turbulences.[49] Le fluide classique de Madelung peut alors s'interpréter comme un fluide moyen. Cette hypothèse de l'existence de turbulences à l'intérieur du fluide est reprise par Bohm et Vigier lorsqu'ils vont introduire le milieu subquantique.

Néanmoins, Bohm critique la quantification du fluide opérée par Takabayasi et Schönberg. Il considère en effet la procédure contraire avec l'esprit d'une description classique des phénomènes quantiques dans laquelle la notion d'opérateur au sens de la mécanique quantique usuelle n'a pas sa place.[50] Cette divergence révèle les approches différentes de Bohm, Vigier et de Broglie d'une part, et Takabayasi et Schönberg d'autre part. Pour les seconds, il s'agit bien d'explorer un modèle, de le pousser au bout de ses possibilités, sans pour autant ériger le respect de « l'esprit classique» en un principe. Nous aurons l'occasion de revenir plus en détail sur ce lien de ICMQ avec le classicisme à la section 7.3 page 225.

4.3.4 La représentation hydrodynamique de l'équation de Klein-Gordon

Takabayasi souhaite naturellement étendre la représentation hydrodynamique aux équations relativistes de la mécanique quantique, à commencer par celle de Klein-Gordon. La dérivation de l'équation de Hamilton-Jacobi n'est cependant pas aussi immédiate que dans le cas de l'équation de Schrödinger et certaines précautions doivent être prises qui vont fortement restreindre le domaine de validité du modèle.

En employant la procédure habituelle, il commence par séparer des parties réelle

48. Avec $\mathcal{H} = -P\dot{S} - \mathcal{L}$ avec $\mathcal{L} = \Psi^\star \left(i\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\nabla^2}{2m} \right) \Psi$ la densité lagrangienne du champ de Schrödinger et $\Psi = R.\,\mathrm{e}^{i\frac{S}{\hbar}}$

49. Schönberg, « On the Hydrodynamical Model of the Quantum Mechanics», 127–133.

50. Bohm, « Comments on an Article of Takabayasi concerning the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures», 286–287.

et imaginaire de l'équation de Klein-Gordon :

$$\{(\frac{\hbar}{i}\partial_\mu - \frac{e}{c}A_\mu)^2 + m^2c^2\}\Psi = 0 \tag{4.14}$$

Cette séparation donne le système :

$$\begin{cases} \left(\partial_\mu S - \frac{e}{c}A_\mu\right)^2 + m^2c^2 - \hbar^2\frac{\Box R}{R} = 0 \\ \partial_\mu\left\{P\left(\partial\mu S - \frac{e}{c}A^\mu\right)\right\} = 0 \quad (P \equiv R^2) \end{cases} \tag{4.15}$$

Or, contrairement au cas non relativiste, la quantité $(\partial_\mu S - \frac{e}{c}A_\mu)/m$ ne peut pas être directement considérée comme la quadrivitesse relativiste. En effet, sa pseudo norme ne satisfait pas à la relation d'invariance par transformation de Lorentz $u_\mu u^\mu = -c^2$ imposée par la relativité, sauf si l'on se place à la limite classique, c'est-à-dire que le potentiel quantique $\frac{\Box R}{R}$ est nul. De même, la fonction $j^0 = \frac{P}{m}(\partial^0 S - \frac{e}{c}A^0)$ ne peut pas être assimilée à la densité ρ, car elle n'est pas définie positivement.[51] Pour rendre la vitesse invariante, Takabayasi considère que la particule se déplace sous l'influence d'un champ scalaire U, en plus du potentiel électromagnétique A_μ, qu'il interprète comme un décalage de la masse $\delta m = fU/c^2$ où f est une constante de couplage. La masse au repos est ainsi la masse variable « renormalisée» $m_0 = m + \delta m$. Takabayasi retrouve ici indépendamment un même résultat établi par de Broglie dans son article de 1927 « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement» (voir section 1.1.4 page 30).[52]

Takabayasi peut ensuite écrire le lagrangien d'un tel système dans lequel il va imposer à la vitesse la relation $u_\mu u^\mu = -c^2$:

$$L = \frac{1}{2}(m + fU/c^2)(u_\mu u^\mu - c^2) + (e/c)\, u_\mu A^\mu \tag{4.16}$$

Il en déduit les valeurs de la quantité de mouvement p_μ et de l'hamiltonien de Klein-Gordon H_{KG} :

$$\begin{cases} p_\mu = \frac{\partial L}{\partial u^\mu} = (m + fU/c^2)u_\mu + eA_\mu/c \\ H_{KG} = p_\mu u^\mu - L = \frac{1}{2}\left(\frac{(p_\mu - eA_\mu/c)^2}{m + fU/c^2} + mc^2 + fU\right) \end{cases} \tag{4.17}$$

L'équation du mouvement se retrouve aisément à partir de l'hamiltonien :

$$m\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\tau}\left[\left(1 + \frac{fU}{mc^2}\right)u^\mu\right] = \frac{e}{c}u_\nu F^{\mu\nu} - f\partial^\mu U \tag{4.18}$$

51. En relativité, les composantes du 4-vecteur courant j^μ sont la densité $j^0 = \rho c$ et le vecteur courant $\boldsymbol{j}$.

52. de Broglie, « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement».

De cette dernière équation, il remarque que le facteur de Lorentz γ de la relativité apparait sous la forme $(1+\frac{fU}{mc^2})$. En introduisant la densité au repos $P_0 = \gamma P$, les équations de Hamilton-Jacobi et de continuité deviennent alors :

$$\begin{cases} (\partial_\mu S - \frac{e}{c}A_\mu)^2 + (mc + fU/c)^2 = 0 \\ \partial_\mu \left(P_0 \frac{\partial_\mu S - eA^\mu/c}{m + fU/c^2} \right) = 0 \end{cases} \tag{4.19}$$

Par identification avec les équations (4.15), Takabayasi en déduit les égalités suivantes :

$$\begin{cases} fU = mc^2(\gamma - 1) \\ \gamma = (1 - \lambda_c^2 \frac{\Box R}{R})^{1/2} \\ \lambda_c = \hbar/mc \end{cases} \tag{4.20}$$

Le facteur γ apparait dans la théorie comme un facteur à la fois quantique et relativiste. Pour que les quantités P_0 et U aient une signification physique, il faut impérativement que $\gamma \geq 0$ et donc que $\lambda_c^2 \frac{\Box R}{R} \leq 1$. Cette condition constitue le talon d'Achille de la représentation hydrodynamique de l'équation de Klein-Gordon en restreignant son domaine de validité. Elle est non respectée dans les cas limites des particules de masses quasi nulles, ou lorsque le taux de fluctuations de R est très élevé, ou encore lorsque $R \to 0$.

Enfin, la vitesse compatible avec la règle d'invariance relativiste est :

$$u^\mu = \left(\partial^\mu S - \frac{e}{c} A^\mu \right) \Big/ m\gamma \tag{4.21}$$

Ces quelques précautions préalables effectuées, malgré leur caractère restrictif, permettent à Takabayasi d'envisager une formulation hydrodynamique qu'il considère comme satisfaisante d'un fluide relativiste quasi irrotationnel. En prenant pour expression de la vitesse $\bar{u}_\mu = \gamma u_\mu$, la transcription relativiste du rotationnel $\boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{v} = -\, e\boldsymbol{H}/mc$ est :

$$\partial_\mu \bar{u}_\nu - \partial_\nu \bar{u}_\mu = -\frac{e}{mc} F_{\mu\nu} \tag{4.22}$$

où $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ est le tenseur de Maxwell. Takabayasi considère cette propriété intéressante pour le modèle en cela que la quantité $\bar{u}$ peut être interprétée à la fois comme un champ de vitesse et comme un potentiel électromagnétique auquel la condition de jauge particulière suivante serait imposée (en tenant compte de (4.20)) :[53]

$$\bar{u}_\mu \bar{u}^\mu = -\gamma^2 c^2 = -c^2 + \hbar^2 \frac{\Box R}{R} \tag{4.23}$$

53. En électromagnétisme, une jauge sert à fixer le potentiel vecteur qui, en raison des règles de l'analyse vectorielle, n'est pas défini de manière unique.

Dans ce formalisme, le courant $j^\mu = eP_0u^\mu = eP\bar{u}^\mu$ doit alors satisfaire aux équations de Maxwell $\partial_\nu F^{\mu\nu} = \frac{e}{c}P\bar{u}^\mu$. Les considérations précédentes permettent à Takabayasi de réécrire les deux équations fondamentales de la représentation hydrodynamique de l'équation de Klein-Gordon :

$$\begin{cases} (\partial_\mu S - \frac{e}{c}A_\mu)^2 + m^2c^2 - \hbar^2\frac{\Box R}{R} = 0 \\ \partial_\mu\partial_\nu A^\nu - \Box A_\mu = (e/mc)P(\partial_\mu S - \frac{e}{c}) \end{cases} \tag{4.24}$$

La première correspond à la partie réelle de l'équation de Klein-Gordon et la deuxième donne les équations de Maxwell en fonction de A_μ. Cette dernière remplace l'équation de continuité habituelle qui en est directement dérivable.

La condition de jauge (4.23) est d'une double conséquence pour le modèle. Elle impose au fluide d'être quasi irrotationnel au sens que donne Takabayasi à cette expression, mais, surtout, elle permet de formuler les équations précédentes en supprimant totalement les potentiels S et A^μ des équations pour ne conserver que les variables vitesse $\bar{u}$ et densité $P = R^2$. L'avantage d'une telle transformation pour Takabayasi est que contrairement aux premières, ces dernières variables possèdent une signification physique immédiate. Avec celles-ci, le système (4.24) devient :

$$\begin{cases} \bar{u}_\mu = \gamma u_\mu = (\partial_\mu S - \frac{e}{c}A_\mu)/m \\ \partial_\mu\partial_\nu\bar{u}^\nu - \Box\,\bar{u}_\mu = (e/mc)^2P\bar{u}_\mu \end{cases} \tag{4.25}$$

Le présent modèle est qualifié par son auteur d'« hydrodynamique électrodynamique». C'est-à-dire qu'il décrit l'évolution d'un fluide chargé dont chaque partie interagit avec les autres par l'intermédiaire du champ électromagnétique et du potentiel quantique.

4.3.5 La représentation hydrodynamique et la « nouvelle» théorie classique de l'électron de Dirac

L'une des propriétés les plus remarquables du modèle hydrodynamique de l'équation de Klein-Gordon mis en avant par Takabayasi est qu'à l'approximation classique lorsque $\hbar^2\frac{\Box R}{R} = 0$, il devient équivalent à la « nouvelle» théorie de l'électron de Dirac de 1951 :[54]

54. Paul A. M. Dirac, «A New Classical Theory of Electrons», *Proc. R. Soc. A* 209, n° 1098 (1951) : 291-296 ; Pour une histoire détaillée de l'équation, voir : Kragh, *Dirac*, 189–204.

$$\begin{cases} u_\mu u^\nu = -c^2 \\ \partial_\mu u_\nu - \partial_\nu u_\mu = -\frac{e}{mc} F_{\mu\nu} \\ \partial_\nu F^{\mu\nu} = \frac{e}{c} P u^\mu \end{cases} \tag{4.26}$$

En conclusion, Takabayasi se permet d'insister sur les faiblesses de la théorie de Dirac, au premier rang desquelles son instabilité. Elle est une théorie électrodynamique pure dans le sens qu'elle n'a pas recours aux charges ponctuelles, solution préconisée par Dirac pour remédier aux infinis en QED. Par contre, le prix à payer est une instabilité, puisqu'en la présence d'une seule matière chargée du même signe, toutes les parties se repoussent mutuellement. Takabayasi doute que la théorie ne lève magiquement ces difficultés lors de sa quantification. Pour compenser, il faudrait d'après lui introduire dans la théorie de la matière de signe opposé qui serait mélangée avec le fluide chargé négativement. Ceci lui parait cependant difficilement envisageable, car cela contredirait le principe d'impénétrabilité de la matière. L'autre solution passerait par l'ajout d'un potentiel qui assurerait la cohésion. Ne croyant pas au succès d'un tel programme, il adopte finalement envers la théorie de Dirac la même attitude prudente qu'envers la théorie de Bohm ou sa propre représentation hydrodynamique :

> Nous ne considérons pas cette vue de Dirac pleinement légitime ; néanmoins, le problème même des mouvements classiques et de leur quantification en matière continue chargée interagissant avec le champ électromagnétique mériterait d'être pleinement étudié, et pourrait peut-être servir à décrire certains types d'états constitués approximativement d'un assemblage de particules chargées.[55]

4.3.6 Les travaux ultérieurs de Takabayasi sur la représentation hydrodynamique

Après ces deux premiers articles, Takabayasi continue à explorer la représentation hydrodynamique. En particulier, il en propose une amélioration en 1954 dans laquelle le système évolue dans l'espace des phases à $6N$ dimensions (espace des positions et des moments) en lieu et place de l'espace de configuration à $3N$ dimensions (espace des positions seules). Pour ce faire, l'équation d'onde sous sa forme polaire est substituée par la distribution de Wigner de 1932 qui exprime la densité de probabilité dans l'espace des phases. Takabayasi considère cette seconde version comme plus générale. Il montre

55. « We do not consider this view of Dirac be fully legitimate ; nevertheless the very problem of classical motions and their quantization of charged mechanical continuous matter interacting with electromagnetic field would be worth while to be fully investigated, and may serve to describe certain sort of states of an assembly of charged particles approximately.» Takabayasi, « Remarks on the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures and on Relations between Linear Scalar Fields and Hydrodynamical Fields», 205.

entre autres que le potentiel quantique de la première apparait comme le résultat de la projection de l'espace des phases sur l'espace de configuration.[56] Bohm et Vigier n'ont pas suivi Takabayasi dans cette voie originale qui souligne une fois de plus l'approche singulière du Japonais vis-à-vis des différentes formulations mathématiques de la mécanique quantique. La description dans l'espace des phases s'éloigne de la description spatiotemporelle à laquelle tiennent Vigier et de Broglie, Bohm s'accommodant pour sa part plus facilement d'un système qui évoluerait dans un espace de dimension supérieur à 3 (voir les critiques en ce sens de de Broglie adressées aux variables cachées de Bohm dans la section 2.1 page 60 ainsi que les tentatives pour ramener la théorie dans l'espace à 3 dimensions à la section 3.3 page 109). Takabayasi « joue» avec les différents modèles quantiques afin de déterminer jusqu'à quelles conclusions ils peuvent le mener. Ainsi, il ne s'interdit aucune manipulation *a priori* des équations, au contraire de Bohm, Vigier et de Broglie qui, par cohérence avec l'esprit classique de l'ICMQ, s'opposent par principe à la procédure de quantification. Takabayasi n'a pour sa part pas ce problème de conscience.

56. Takehiko Takabayasi, « The formulation of quantum mechanics in terms of an ensemble in phase space», *PTP* 4–5 (11 1954) : 341–343.

Chapitre 5

Le modèle Bohm-Vigier et la théorie des niveaux d'organisation de la nature

Nous allons à présent aborder les travaux issus de la collaboration entre Bohm et Vigier lors du séjour de ce dernier à l'USP pendant l'été 1953. Ces travaux donnent naissance à ce que l'on peut appeler le modèle Bohm-Vigier. Bien que ce modèle soit dans le prolongement des travaux poursuivis indépendamment par les deux physiciens, il s'en différencie toutefois sur plusieurs aspects importants. Le plus notable est le passage à la représentation hydrodynamique. C'est en effet une conséquence majeure des contributions de Takabayasi, suivies par celles de Schönberg, que d'avoir convaincu Bohm et Vigier qu'avec la représentation hydrodynamique l'ICMQ gagne en consistance. Ce changement de représentation est motivé par plusieurs exigences théoriques. Dans la perspective de la prise en compte du spin, le formalisme de l'hydrodynamique offre les outils mathématiques adéquats en permettant de le traiter comme un mouvement rotationnel, qui peut se modéliser comme un tourbillon du fluide quantique. Ce genre de représentation est cohérent avec l'esprit de l'ICMQ qui privilégie les représentations imagées et intuitives des phénomènes. Le cas du spin est d'autant plus intéressant qu'il s'agit d'une propriété quantique sans aucun équivalent classique. L'intégration du spin au sein de ICMQ est l'objet du chapitre 6.

Le modèle hydrodynamique permet également d'introduire le milieu subquantique, siège de mouvements chaotiques à l'origine de fluctuations du fluide quantique. Ce nouveau milieu est mobilisé en tant qu'hypothèse physique afin de démontrer que la répartition des particules dans l'ICMQ est identique à celle prédite par la règle de Born de l'ISMQ. Cette identité des répartitions est jusqu'alors postulée, mais dans la perspective de renforcer la cohérence interne du modèle, Bohm et Vigier souhaitent l'élever au rang de propriété. L'introduction de ce milieu est aussi l'occasion pour les

physiciens de repenser la relation entre le déterminisme et le hasard et de proposer une épistémologie de la physique fondée sur cette dialectique qu'ils appellent « théorie des niveaux d'organisation de la nature». Ces deux points constituent le plan général de ce chapitre.

5.1 La démonstration de la règle de Born dans le cadre de l'ICMQ

5.1.1 Le besoin d'une démonstration de la règle de Born et les premières tentatives

La remise au goût du jour du modèle hydrodynamique par Takabayasi et Schönberg ne laisse pas Bohm et Vigier indifférents et ils décident alors de l'intégrer à leurs travaux. À l'origine, cette adoption est justifiée par la résolution d'un problème théorique bien précis, celui de la démonstration de la validité de la règle de Born dans le cadre de l'ICMQ, c'est-à-dire que, quelle que soit la répartition initiale des particules, celle-ci tend systématiquement vers un « équilibre quantique» identique à la distribution $P = \rho = |\Psi|^2$. L'expression « équilibre quantique» employée par Bohm et Vigier est une analogie avec l'équilibre thermique de la thermodynamique classique. L'équilibre quantique contient néanmoins une différence majeure avec l'équilibre thermique puisque si l'équilibre thermique est stationnaire, l'équilibre quantique évolue pour sa part dans le temps (comme Ψ est fonction du temps ρ l'est également).[1] En thermodynamique classique, selon le théorème de Liouville, la densité de probabilité ρ_c dans l'espace des phases est en effet constante au cours du temps, ce qui signifie que le volume de l'espace des phases demeure constant.[2]

Jusque-là, cette distribution est postulée par l'ICMQ qui, additionnée à l'équation de continuité $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla} \cdot (\rho.\boldsymbol{v}) = 0$, permet l'équivalence entre l'ICMQ et l'ISMQ. En effet, si cette répartition est assurée dans l'état initial alors l'équation de continuité garantit qu'elle se préserve au cours du temps. Le postulat de l'équilibre quantique est toutefois remis en cause par Keller[3] et Pauli pour qui dans « une théorie déterministe une hypothèse au sujet des probabilités n'a pas sa place.»[4] Bohm et Vigier prennent la critique au sérieux. Ils concèdent que dans une interprétation réaliste conséquente de la mécanique quantique, l'état d'équilibre devrait en effet découler des propriétés du sys-

1. Craig Callender, «The Emergence and Interpretation of Probability in Bohmian Mechanics», *Stud. Hist. Philos. Sci. B* 38, n° 2 (2007) : 354.

2. $\frac{\mathrm{d}\rho_c}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_c \dot{q})}{\partial q} + \frac{\partial(\rho_c \dot{p})}{\partial p} = 0$

3. Joseph B. Keller, «Bohm's Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables», *Phys. Rev.* 89 (1953) : 1040-1041.

4. Wolfgang Pauli, «Remarques sur le problème des paramètres cachés dans la mécanique quantique et sur la théorie de l'onde pilote», in George, *Louis de Broglie. Physicien et penseur*, 37–38.

tème et ne pas être un postulat. Entre deux théories qui expliquent une même classe de phénomènes, celle qui dispose d'un nombre réduit de postulats est préférable. Ainsi, bien que sans conséquences empiriques immédiates, la justification du postulat de l'équilibre quantique améliorerait la cohérence interne de l'ICMQ.

Cette interprétation statistique la règle de Born coïncide avec celle de Blokhintzev et Terletski, principaux critiques de la complémentarité en Union soviétique. Ces deux auteurs sont nommément cités par Vigier dans sa thèse de doctorat pour cette interprétation dont il reprend les conclusions à son compte.[5] Il faut cependant remarquer que si Vigier associe systématiquement les interprétations de Blokhintzev et de Terletski, elles ne sont pas similaires. Terletski est en faveur des variables cachées, bien que d'un type différent de celui de Bohm et de Vigier, alors que ce n'est clairement pas le cas de Blokhintzev, qui s'y oppose de manière franche.[6] Dans l'interprétation de Blokhintzev, la fonction d'onde décrit l'évolution d'un ensemble de systèmes préparés de manière identique, à la différence de l'ISMQ où elle décrit des évènements individuels. Dans l'interprétation des ensembles, la règle de Born $|\Psi|^2$ indique la fraction des systèmes qui possèdent une valeur commune.[7] Blokhintzev avance que la spécificité des quanta est qu'il n'est plus possible d'isoler le système (la particule) de son environnement proche comme en mécanique quantique :

> Quelle est donc en réalité la nature d'un ensemble quantique ? Le fond de la question, c'est qu'il n'y a dans la nature aucune division absolue en monde microscopique et monde macroscopique. Les phénomènes du monde microscopique se déroulent à l'intérieur du monde macroscopique, et si nous isolons mentalement un certain phénomène miscorospique, il n'en reste pas moins en réalité lié au monde macroscopique, aux corps macroscopiques, peut-on dire. L'isolement des systèmes microscopiques, qui paraissait possible du point de vue des conceptions classiques, n'est en fait pas réalisé, parce que les interactions sont finies.[8]

C'est cette interdépendance entre le système et son environnement macroscopique qui est à l'origine des relations d'indétermination de Heisenberg.

Ce n'est pas la première fois que les physiciens se penchent sur la question. Dans son article de 1952, Bohm encadre déjà le problème et donne des pistes pour démontrer la règle de Born en émettant l'hypothèse que la distribution $|\Psi|^2$ résulterait en réalité de l'action de forces chaotiques sur le système. Il conjecture d'ailleurs que la règle de Born

5. Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 116.

6. Blokhintzev explicite les différences entre son interprétation et celle de Terletski dans : Dimitri I. Blokhinzev, «Du développement de la physique actuelle», *NC* 113 (1960) : 64-70.

7. Alexander Pechenkin, «The early statistical interpretations of quantum mechanics in the USA and USSR», *Stud. Hist. Philos. Sci. B* 43, n° 1 (2012) : 26–27 ; Sur l'interprétation des ensembles en lien avec les critiques soviétiques de la complémentarité, voir : Alexei Kojevnikov, «Probability, Marxism, and Quantum Ensembles», *Yearbook of the European Culture of Science*, 2012, 211-235.

8. Blokhinzev, « Critique de la conception idéaliste de la théorie quantique», 111.

cessera probablement d'être valable pour des échelles spatiales de l'ordre de 10^{-13} cm, qui nécessiteront donc une nouvelle mécanique.[9] Il envisage une première démonstration au printemps 1952 qui débouche sur une publication en janvier 1953.[10] De leur côté, Vigier, Schatzman et Régnier étudient également la question dès 1952.[11] Ces premières démonstrations sont, dans leur esprit, semblables à celle du théorème H de Boltzmann. C'est-à-dire qu'elles s'appuient sur la dynamique des particules pour démontrer, qu'à l'équilibre, leur distribution tend vers $|\Psi|^2$. Cependant, les physiciens les considèrent comme insuffisamment générales. Par exemple, la démonstration de Bohm s'appuie sur un cas particulier de molécules de dihydrogène soumises à des collisions extérieures aléatoires. Il montre que, dans ce cas précis, la distribution des molécules tend vers $|\Psi|^2$,[12] mais il est cependant incapable de produire une démonstration plus générale de retour à l'état d'équilibre qui serait valable indépendamment du type de particule.

Ces travaux ne constituent pas les premières tentatives d'introduction de processus aléatoires en mécanique quantique. En réalité, il existe toute une tradition de physique stochastique qui débute dans les années 1950, notamment avec le Hongrois Imre Fényes et l'Allemand Fritz Bopp.[13] Dans celle-ci, les mouvements des particules sont modélisés comme des processus browniens. Il apparait en effet que même en mécanique classique, les mouvements de type browniens introduisent des indéterminations fondamentales sur la mesure des propriétés. Ces auteurs ont alors voulu montrer que l'indéterminisme quantique n'est pas d'une nature fondamentalement différente de celui des théories probabilistes et stochastiques classiques. Par exemple, Fényes dérive une inégalité similaire à celle de Heisenberg à partir de positions distribuées aléatoirement et d'une vitesse totale stochastique.[14] Quelques années plus tard, en 1966, Edward Nelson utilise la mécanique stochastique pour déduire l'équation de Schrödinger à partir de la mécanique newtonienne.[15]

9. Bohm, « A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 2 », 185–186.

10. Bohm, « Proof That Probability Density Approaches $|\Psi|^2$ in Causal Interpretation of the Quantum Theory ».

11. Régnier, Schatzman et Vigier, « Sur la répartition statistique des mouvements des particules en Mécanique quantique ».

12. Bohm, « Proof That Probability Density Approaches $|\Psi|^2$ in Causal Interpretation of the Quantum Theory », 462.

13. À propos des théories stochastiques, voir : Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, 418–438 ; Cushing, *Quantum Mechanics*, 156–173 ; David Wick, *The Infamous Boundaries : Seven Decades of Heresy in Quantum Physics* (Boston, MA : Birkhäuser, 1995), 75–82.

14. Imre Fényes, « Eine wahrscheinlichkeitstheoretische Begründung und Interpretation der Quantenmechanik », *Zeitschrift für Physik* 132, n° 1 (1952) : 81-106.

15. Edward Nelson, « Derivation of the Schrödinger Equation from Newtonian Mechanics », *Phys. Rev.* 150, n° 4 (1966) : 1079-1085 ; Voir également : Edward Nelson, *Quantum fluctuations* (Princeton, NJ : Princeton University Press, 1985).

5.1.2 La démonstration de 1953 par les fluctuations de la fonction d'onde

La nouvelle démonstration élaborée par Bohm et Vigier est le fruit d'un travail commun lors de l'invitation de Vigier par Bohm à passer trois mois à l'USP pendant l'été 1953. Bohm bénéficie en effet d'une bourse du Conselho Nacional de Pesquisa (CNPQ) brésilien qui soutient officiellement ses recherches sur l'ICMQ.[16] C'est la première fois que les deux physiciens se rencontrent en personne et l'on imagine aisément que, sur un point purement personnel, Bohm se réjouit de la visite de Vigier. En effet, comme il en témoigne à Schatzman, il n'affectionne pas particulièrement le Brésil, et l'ambiance délétère qui règne au sein du département de physique de l'USP pour des raisons de financement n'arrange rien à son sentiment d'isolement.[17] Du point de vue de Vigier, cette collaboration avec Bohm lui confère une certaine visibilité puisqu'elle débouche sur une publication dans la prestigieuse *Physical Review*. Il s'agit en effet pour Vigier de sa première publication dans une revue d'audience internationale qui lui permet ainsi de sortir de la confidentialité des notes publiées aux *CRAS*.

La démonstration procède différemment des premières tentatives de type « théorème H ». Elle introduit le postulat de l'existence de fluctuations aléatoires, situées à l'intérieur du champ quantique $\Psi(\boldsymbol{x}, t)$ et qui sont modélisées par des processus markoviens.[18] Le champ quantique, solution de l'équation de Schrödinger, est alors interprété comme un champ moyen. Ces fluctuations aléatoires du champ quantique font tendre l'état du système vers la distribution de Born, et ce, quelle que soit la répartition initiale des particules. Dans cette perspective, la représentation hydrodynamique offre un cadre naturel pour modéliser ces fluctuations en les assimilant à des sortes de turbulences, selon une idée suggérée par Schönberg. En effet, comme le précisent les auteurs, « le fluide de Madelung est supposé être un fluide physique réel, il est alors assez naturel de supposer qu'il subit des fluctuations plus ou moins aléatoires dans ses mouvements. »[19] L'origine de ces fluctuations proviendraient d'un milieu « subquantique » dans lequel baignerait le fluide de Madelung. Dans l'article, ce concept n'est pas développé au-delà de sa simple évocation (p. 210). On trouve également l'emploi du terme « substructure » (p. 209) qui évoque une idée similaire de l'existence d'un niveau plus profond que celui de la mécanique quantique. Dans des écrits annexes, Bohm et Vigier auront l'occasion de développer ce concept important pour l'ICMQ

16. Freire Jr., « Science and exile : David Bohm, the Cold War, and a new interpretation of quantum mechanics », 16–18.

17. Bohm, David Bohm à Évry Schatzman ; Freire Jr., « Science and exile : David Bohm, the Cold War, and a new interpretation of quantum mechanics », 13.

18. Un processus de Markov est un processus stochastique dans lequel l'état futur du système est déterminé uniquement par l'état présent et ne dépend pas de l'état passé.

19. Bohm et Vigier, « Model of the Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations », 209.

plus en détail. Nous y reviendrons dans la section suivante de ce chapitre.

L'adoption de la représentation hydrodynamique par Bohm et Vigier, telle que proposée par Madelung et améliorée ensuite par Takabayasi et Schönberg, ne pouvait se faire sans apporter une modification de taille afin qu'elle concorde avec les principes de l'ICMQ :

> Le modèle ci-dessus ne se suffit cependant pas à lui-même ; car il ne contient rien pour décrire l'emplacement réel, $\xi(t)$, de la particule, qui rend possible, comme nous l'avons vu dans des articles précédents, une ICMQ cohérente de la théorie quantique. À ce stade, nous complétons le modèle en postulant une particule, qui prend la forme d'une inhomogénéité hautement localisée qui se déplace avec la vitesse locale du fluide, $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x}, t)$.
>
> La nature précise de cette inhomogénéité est sans importance pour notre objectif. Il pourrait s'agir, par exemple, d'un corps étranger, d'une densité proche de celle du fluide, qui aurait simplement été porté à la vitesse locale du fluide comme le serait un petit corps flottant transporté le long de la surface de l'eau à la vitesse locale du champ de vitesse de l'eau. Ou bien, il pourrait s'agir d'une structure dynamique stable existante dans le fluide ; par exemple, un petit vortex stable ou une autre structure stable localisée, telle une petite inhomogénéité de la forme d'une impulsion. Il se pourrait que de telles structures soient stabilisées par une certaine non-linéarité dans une approximation plus précise des équations régissant les mouvements du fluide que celles données par [(4.1)] et [(4.2)].[20]

On retrouve dans ces lignes l'idée de la double solution de de Broglie et reprise par Vigier dans sa thèse d'assimiler les particules en des régions singulières d'un phénomène étendu. Un concept que les auteurs souhaitent maintenir dans la représentation hydrodynamique puisqu'elle permet de donner un sens à la variable position, bien que la particule soit représentée par un fluide occupant tout l'espace. L'adoption du modèle hydrodynamique symbolise la collaboration entre les Français et l'Américain :[21]

20. « The above model is, however, not adequate by itself ; for it contains nothing to describe the actual location, $\xi(t)$, of the particle, which makes possible, as we have seen in previous papers, a consistent causal interpretation of the quantum theory. At this point, we therefore complete the model by postulating a particle, which takes the form of a highly localized inhomogeneity that moves with the local fluid velocity, $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x}, t)$. The precise nature of this inhomogeneity is irrelevant for our purposes. It could be, for example, a foreign body, of a density close to that of the fuid, which was simply being carried along with the local velocity of the fluid as a small floating body is carried along the surface of the water at the local stream velocity of the water. Or else it could be a stable dynamic structure existing in the fluid ; for example, a small stable vortex or some other stable localized structure, such as a small pulse-like inhomogeneity. Such structures might be that would be present stabilized by some nonlinearity in a more accurate approximation to the equations governing the fluid motions than is given by [(4.1)] and [(4.2)]» Les équations auxquelles se réfère la citation correspondent bien à celles présentées en début de chapitre avec une numérotation évidemment différente. Bohm et Vigier, « Model of the Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations», 209.

21. En toute rigueur, Bohm est brésilien à cette période puisqu'il demande la nationalité brésilienne en conséquence de la confiscation de son passeport par l'ambassade américaine, mais le Brésil interdisant la double nationalité, il doit alors renoncer à sa citoyenneté américaine. Freire Jr., « Science and exile : David Bohm, the Cold War, and a new interpretation of quantum mechanics», 6.

le formalisme mathématique est similaire à celui des variables cachées de Bohm, mais il permet d'inclure les idées fortes de de Broglie et de Vigier quant à la nature étendue de la matière et la présence d'une singularité.

L'introduction des fluctuations à l'intérieur du fluide fait varier la densité ρ et la vitesse $\boldsymbol{v}$ autour de valeurs moyennes $\boldsymbol{v_0}(\boldsymbol{x},t)$ et $\rho_0(\boldsymbol{x},t)$. Ces fluctuations n'ayant aucune influence sur l'équation de continuité, les relations :

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_0}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla} \cdot (\rho_0 \boldsymbol{v_0}) = 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla} \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0 \end{cases} \tag{5.1}$$

demeurent toujours vraies. Bohm et Vigier vont alors tenter de démontrer que la densité ρ du fluide réel approche la densité théorique moyenne $|\Psi|^2 = \rho_0$, c'est-à-dire que le rapport entre la densité du fluide fluctuant sur la densité moyenne tend vers une constante au bout d'un certain temps ϵ ($\lim_{t\to\epsilon} \frac{P(\boldsymbol{x},t)}{\rho_0(\boldsymbol{x},t)} = C$). D'un point de vue physique, les fluctuations font « sauter » les différentes inhomogénéités du fluide, qui symbolisent les particules, d'une ligne de courant à une autre. La démonstration tient alors à prouver que ces sauts mènent à une distribution des inhomogénéités qui tend vers la règle de Born. En toute rigueur, ρ et $\boldsymbol{v}$ ne pourront jamais être égales aux valeurs moyennes, car cela impliquerait un non-respect de l'équation de continuité. Par contre, leurs écarts par rapport aux valeurs moyennes observables peuvent être inférieurs à l'incertitude de la mesure, ce qui les rend non distinguables en pratique.

Pour ce faire, les auteurs commencent par introduire de nouvelles coordonnées $\boldsymbol{\xi} = (\xi_1(\boldsymbol{x}), \xi_2(\boldsymbol{x}), \xi_3(\boldsymbol{x}))$ définies de telle sorte qu'exprimée à l'aide de celles-ci la quantité moyenne de fluide $\mathrm{d}Q$ est proportionnelle à un élément de volume $\mathrm{d}\boldsymbol{\xi} = \mathrm{d}\xi_1 \mathrm{d}\xi_2 \mathrm{d}\xi_3$, soit :

$$\mathrm{d}Q = \rho_0(\boldsymbol{x},t)\mathrm{d}\boldsymbol{x} = \rho_0(\boldsymbol{x},t) J\left(\frac{\partial x_\mu}{\partial \xi_\nu}\right) \mathrm{d}\boldsymbol{\xi} \tag{5.2}$$

où $J\left(\frac{\partial x_\mu}{\partial \xi_\nu}\right)$ est le jacobien de transformation des coordonnées.[22] Cette quantité de matière doit être proportionnelle au volume $\mathrm{d}\boldsymbol{\xi}$, ce qui implique que $J\left(\frac{\partial x_\mu}{\partial \xi_\nu}\right) \rho_0(\boldsymbol{x},t) = \mathrm{Cste}$. À partir de ces quelques considérations préliminaires, Bohm et Vigier peuvent ainsi exprimer la variation de la densité de probabilité $P(x,t)$ ainsi que son expression $F(\boldsymbol{\xi},t)$ selon le nouveau système de coordonnées :

$$P(\boldsymbol{x},t)\mathrm{d}\boldsymbol{x} = \frac{P(\boldsymbol{x},t)}{\rho_0(\boldsymbol{x},t)}\mathrm{d}\xi = \frac{P(\boldsymbol{x},t)}{J\left(\frac{\partial \xi_\nu}{\partial x_\mu}\right)} = F(\boldsymbol{\xi},t)\mathrm{d}\boldsymbol{\xi} \tag{5.3}$$

Ils définissent ensuite la probabilité $\mathrm{d}P = K(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{\xi}',t,t')\mathrm{d}\boldsymbol{\xi}'$ pour qu'un élément du fluide $\delta\boldsymbol{\xi}'$ centré au point $\boldsymbol{\xi}'$ à l'instant t' se retrouve à l'instant t dans l'élément $\delta\boldsymbol{\xi}$ cen-

22. Par définition : $\mathrm{d}\boldsymbol{x} = J\left(\frac{\partial x_\mu}{\partial \xi_\nu}\right)\mathrm{d}\boldsymbol{\xi}$

tré au point $\boldsymbol{\xi}$. Dans la terminologie statistique, K est le noyau (*kernel*) de la densité de probabilité. Il permet de modéliser mathématiquement les fluctuations et faire « sauter» les inhomogénéités du fluide d'une ligne de courant à une autre. La densité de probabilité est évidemment normalisée (tous les éléments proviennent de et atterrissent quelque part) :

$$\int K(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\xi'}, t, t')\mathrm{d}\boldsymbol{\xi'} = 1 \tag{5.4}$$

Bohm et Vigier ne précisent pas dans l'article la nature exacte des fluctuations introduites par K. L'unique hypothèse émise est que K doit être non nul autour de $\boldsymbol{\xi}$, ce qui est raisonnable puisque cela signifie simplement que dans cette région un élément de fluide au point $\boldsymbol{x}$ possède une probabilité non nulle d'atteindre un autre point $\boldsymbol{x}'$. Vigier, qui reprend la démonstration dans une version plus fournie dans sa thèse de doctorat, précise leur nature markovienne en ajoutant que leur probabilité d'apparition ne dépend que du temps et que les « sauts» des particules se répartissent de façon continue autour du point de départ, sans qu'aucune région de l'espace ne soit interdite. Concrètement, cela signifie que les fluctuations apparaissent comme complètement aléatoires au niveau de la théorie causale.[23]

La densité de probabilité $F(\boldsymbol{\xi}, t)$ peut aussi être formulée comme la densité $F(\boldsymbol{\xi'}, t')$ pondérée par $K(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\xi'}, t, t')$:

$$F(\boldsymbol{\xi}, t) = \int K(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\xi'}, t, t')F(\boldsymbol{\xi'}, t')\mathrm{d}\boldsymbol{\xi'} \tag{5.5}$$

Le point clé de la démonstration est le suivant : à tout instant, il existe un point $\boldsymbol{\xi_M(t)}$ pour lequel la densité de probabilités F est maximum et égale à $M(t)$ ainsi qu'un autre $\boldsymbol{\xi_m(t)}$ où elle est minimum et égale à $m(t)$:

$$\begin{cases} M(t) = \int K(\boldsymbol{\xi_M}(t), \boldsymbol{\xi'}, t, t')F(\boldsymbol{\xi'}, t')\mathrm{d}\boldsymbol{\xi'} \\ m(t) = \int K(\boldsymbol{\xi_m}(t), \boldsymbol{\xi'}, t, t')F(\boldsymbol{\xi'}, t')\mathrm{d}\boldsymbol{\xi'} \end{cases} \tag{5.6}$$

En remplaçant la densité $F(\boldsymbol{\xi'}, t')$ par sa valeur maximale au temps t', soit $M(t')$, alors il est certain que l'intégrale est supérieure ou égale à $M(t)$:

$$\int K(\boldsymbol{\xi_M}(t), \boldsymbol{\xi'}, t, t')M(t')\mathrm{d}\boldsymbol{\xi'} \geqslant M(t) \tag{5.7}$$

Enfin, en sortant $M(t')$ de l'intégrale, celle-ci vaut 1 (en tenant compte de l'équation (5.4)), et donc $M(t') \geqslant M(t)$. Par un raisonnement similaire sur les valeurs minimales, il vient $m(t') \leqslant m(t)$. Comme $t' < t$, ces deux inégalités signifient qu'au cours du temps

23. Pour un résumé de la démonstration alternative de Vigier, consulter l'annexe C.1 Vigier, *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, 103–126.

la densité maximum diminue et la densité minimale augmente, et ce jusqu'à un moment où l'égalité :

$$m(t') = m(t) = M(t') = M(t') \tag{5.8}$$

est satisfaite et se conserve. La densité de probabilités F, qui est le rapport entre la densité du fluide fluctuant et la densité moyenne ρ_0, tend vers une constante, ce que Bohm et Vigier voulaient démontrer.

5.1.3 | Un problème toujours ouvert

La démonstration de Bohm et Vigier n'est pas exempte de défauts. Bohm n'est lui-même pas entièrement satisfait de l'article, mais ne précise pas plus en détail quelles en sont selon lui les principales faiblesses. Il s'en inquiète auprès de Schatzman puisque la visée de l'article se situe au-delà de l'unique justification de la règle de Born. Il souhaiterait en effet qu'il devienne le porte-étendard de l'ICMQ formulée sous sa nouvelle forme hydrodynamique :

> En ce qui concerne l'article sur la probabilité en mécanique quantique, je ne l'ai toujours pas préparé parce que j'attends des commentaires de France sur ce que nous avons fait jusqu'à présent, et en partie parce que je ne suis toujours pas satisfait avec ce que nous avons fait. Les discussions avec les gens ici m'ont convaincu que le modèle hydrodynamique sera détesté par beaucoup de monde. Donc, puisqu'un objectif important de l'article est « propagandiste », cet objectif ne sera probablement pas atteint. Peut-être devrions-nous retourner à l'idée plus générale d'un champ Ψ fluctuant, au lieu d'utiliser le modèle hydrodynamique.[24]

Parmi les critiques, Hans Freistadt souligne que le passage à N corps dans le cadre de l'hydrodynamique est encore plus problématique que dans l'ancienne représentation fondée sur les équations newtoniennes de la mécanique. En effet, la représentation hydrodynamique associe à chaque particule individuelle un fluide propre. Le passage à plusieurs corps interroge sur le modèle physique qu'il faut adopter : un fluide différent pour chaque particule, comme le suggèrent Bohm et Vigier, ou alors comme le pense de Broglie, un fluide différent par type de particule.[25]

Ensuite, l'introduction des fluctuations est discutable. Certes, l'hypothèse possède une valeur heuristique qui ouvre la voie pour l'investigation de nouvelles propriétés physiques. Nous évoquerons plus loin dans ce chapitre un exemple avec de Broglie. Cependant, la démonstration supprime un postulat pour en introduire un autre, ce

24. David Bohm, David Bohm à Évry Schatzman, 9 octobre 1953, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

25. Hans Freistadt, « The Causal Formulation of Quantum Mechanics of Particles (the Theory of De Broglie, Bohm and Takabayasi) », *Supplemento al Nuovo Cimento* v, n° X (1957) : 29 ; Cité dans : Peter J. Riggs, *Quantum Causality : Conceptual Issues in the Causal Theory of Quantum Mechanics* (Dordrecht : Springer, 2009), 75–76.

qui en annule le bénéfice d'un point de vue épistémologique. En effet, ces fluctuations ne s'accompagnent d'aucune conséquence testable empiriquement et l'hypothèse peut se faire contrer pour les mêmes raisons que celui de l'introduction de variables cachées.

Le problème de la démonstration de l'équilibre quantique demeure aujourd'hui ouvert pour les physiciens qui travaillent dans la continuité de l'ICMQ. Les principales voies explorées descendent soit de la première démonstration de type théorème H de Bohm, soit de la preuve de Bohm et Vigier. Callender qualifie le premier type de dynamique, car fondé sur les lois du mouvement déjà établies sans ajouter d'hypothèse supplémentaire quant à la nature de ces lois.[26] Parmi les physiciens notoires qui ont contribué en ce sens figurent Antony Valentini.[27] L'autre approche, qualifiée de « nouvelle dynamique » par Callender, tente de démontrer la règle de Born en modifiant la dynamique du système à l'instar de la preuve de Bohm et de Vigier de 1954. La principale différence entre les preuves de type théorème H et de la nouvelle dynamique est que dans le premier cas, les processus aléatoires proviennent des interactions des particules entre elles, tandis que dans le modèle Bohm-Vigier l'aléatoire provient des interactions entre la particule et un milieu extérieur. Les travaux les plus aboutis en ce sens sont ceux mentionnés plus haut de Nelson ainsi que ceux de Bohm et de Hiley.[28] À cette seconde catégorie peuvent également se rattacher les contributions de Dürr, Goldstein et Zanghí qui partent d'un équilibre global de l'univers et démontrent que la règle de Born s'applique pour des sous-systèmes sur lesquels des mesures seront réalisées en laboratoire.[29]

5.2 La dialectique matérialiste en pratique : le milieu subquantique et la théorie des niveaux d'organisation de la nature

5.2.1 L'origine du milieu subquantique chez Bohm

Comme nous l'avons évoqué, la démonstration de la règle de Born s'effectue au prix de l'introduction de fluctuations aléatoires au sein du fluide de Madelung. Au premier abord, la procédure parait physiquement et conceptuellement suspecte, d'autant

26. Callender, « The Emergence and Interpretation of Probability in Bohmian Mechanics ».
27. Antony Valentini, « Signal-locality, uncertainty, and the subquantum H-theorem. II », *Phys. Let. A* 158 (1991).
28. David Bohm et Basil J. Hiley, *The undivided universe : An ontological interpretation of quantum theory* (New York, NY : Routledge, 1993).
29. Detlef Dürr, Sheldon Goldstein et Nino Zanghì, « Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty », *Journal of Statistical Physics* 67 (1992) : 843-907.

que le retour au déterminisme est l'un des principaux arguments avancés pour justifier le besoin de l'ICMQ. Les auteurs se défendent toutefois de chasser l'indéterminisme quantique par la grande porte pour le réintroduire par la fenêtre, car, précisent-ils, cet indéterminisme est d'une nature différente de celui de l'ISMQ. Dans leur article, Bohm et Vigier sont peu diserts sur l'origine des fluctuations du fluide quantique. Ils ne fournissent qu'un nombre d'hypothèses minimales nécessaires à la démonstration mathématique, mais précisent qu'elles proviendraient d'un milieu subquantique :

> nous pouvons concevoir une sous-structure granulaire de la matière sous-jacente au fluide de Madelung, analogue à (mais pas nécessairement du même genre) la structure moléculaire sous-jacente aux fluides ordinaires.[30]

Toutes les hypothèses sont ouvertes quant à la nature de ce milieu subquantique, puisque les auteurs envisagent même une « structure granulaire », c'est-à-dire d'introduire de la discontinuité. Cette hypothèse dénote d'ailleurs avec la vision de la matière comme un continuum défendue par Vigier dans sa thèse de doctorat (voir section 3.1.2 page 95). Ainsi, le milieu subquantique apparait dans l'article comme une solution *ad hoc* venant justifier physiquement l'introduction de processus aléatoires. Or, la correspondance entre Bohm et Schatzman du début 1952 nous en apprend un peu plus sur son origine. En particulier, elle montre que l'idée est déjà en germe dans l'esprit de Bohm depuis plusieurs années, lorsqu'il effectuait ses recherches sur la physique des plasmas, quelques années avant qu'il emprunte le chemin des variables cachées :

> Je vais résumer mes idées sur comment la théorie du substrat peut se concrétiser. Il s'avère que j'ai travaillé pendant de nombreuses années sur des sujets en relation avec un problème similaire, i.e., la théorie des gaz hautement ionisés, ou « plasmas » comme on les appelle. À partir des principes du matérialisme dialectique, j'ai été conduit d'essayer d'analyser ces gaz du point de vue de l'opposition entre deux effets : (1) Les forces d'interaction électriques entre les particules qui tendent à produire dans l'ensemble un comportement organisé du système, et (2) les mouvements thermiques aléatoires des particules qui tendent à détruire l'organisation et à créer du chaos. Ce mode d'analyse était très fructueux, et a mené à des améliorations considérables de la théorie des métaux.[31]

Les recherches de Bohm sur la physique des plasmas datent de 1949. En collaboration avec Eugene Gross, ils démontrent que les oscillations dans les plasmas n'ont lieu

30. « we may conceive of a granular substructure of matter underlying the Madelung fluid, analogous to (but not necessarily of exactly the same kind as) the molecular structure underlying ordinary fluids. » Bohm et Vigier, « Model of the Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations », 209.

31. David Bohm, David Bohm à Évry Schatzman, [Janvier 1952 ?], Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

qu'à partir d'une longueur d'onde minimale, celle de Debye.[32] Bohm en conclut que les effets de l'état plasma ne se manifestent qu'à grande échelle. Localement, la matière se comporte comme des particules libres, mais, à grande échelle, elle oscille dans un mouvement collectif.[33] En exportant son raisonnement, il propose avec David Pines la première théorie à N corps des électrons dans les métaux.[34] Pour ce faire, il distingue les « variables individuelles» des « variables collectives» des électrons. Avec ce formalisme, trois contributions distinctes apparaissent dans l'hamiltonien du système : l'énergie cinétique des particules, l'énergie des oscillations collectives de longue portée et l'énergie des interactions de courte portée (de l'ordre de grandeur de la longueur de Debye) due au potentiel électrique. Ils montrent que collectivement les électrons sont capables de voyager sur de plus grandes distances sans être diffusés, et sont donc plus libres que s'ils sont considérés individuellement. À ce propos, Kojevnikov effectue un parallèle entre cette articulation des comportements individuels et collectifs des particules chez Bohm et sa vision dialectique de l'engagement en politique, entre la volonté de faire partie, pour l'homme engagé, d'un collectif d'individus tout en maintenant une indépendance d'esprit. Cette analyse prend d'autant plus de sens que Bohm est à ce moment-là au centre de tensions extrêmes, en étant sous surveillance de la HUAC pour bientôt perdre son poste à Princeton et finir par devoir s'exiler au Brésil.[35]

5.2.2 | Du milieu subquantique à la théorie des niveaux d'organisation de la nature

Selon Bohm, il existe différentes échelles d'organisation de la matière qui possèdent chacune ses propres lois. Cette idée, dans le cadre de la mécanique quantique, se matérialise par l'existence d'un milieu subquantique, qu'il nomme initialement *substrat* (*substratum*). L'idée de ce substrat est à la jonction de l'idée d'éther chez Dirac qu'il introduit dans sa seconde théorie classique de l'électron de 1951, et du vide quantique, siège continuel de création et d'annihilation de particules « virtuelles», mais que le matérialisme de Bohm convainc de considérer comme réelles :

> Vous avez peut être lu l'article de Dirac dans *Nature* « Il y a-t-il un Éther ?».[36] Je crois qu'il y a même de plus fortes raisons en faveur d'un

32. David Bohm et Eugene P. Gross, «Theory of plasma oscillations. A. Origin of medium-like behavior», *Phys. Rev.* 75, n° 12 (1949) : 1851-1864.
33. Alexei Kojevnikov, «David Bohm and collective movement», *Hist. Stud. Nat. Sci.* 33, n° 1 (2002) : 178–179.
34. David Bohm et Pines David, «A Collective Description of Electron Interactions. I. Magnetic Interactions», *Phys. Rev.* 82 (1951) : 625-634 ; David Bohm et Pines David, «A Collective Description of Electron Interactions : II. Collective vs Individual Particle Aspects of the Interactions», *Phys. Rev.* 85 (1952) : 338-353 ; David Bohm et Pines David, «A Collective Description of Electron Interactions : III. Coulomb Interactions in a Degenerate Electron Gas», *Phys. Rev.* 92 (1953) : 609-625.
35. Kojevnikov, « David Bohm and collective movement», 182–186.
36. Paul A. M. Dirac, «Is there an Æther ?», *Nature*, n° 168 (1951) : 906-907.

> éther que celles citées par Dirac dans son article. La mécanique quantique a montré que l'espace « vide » a un champ magnétique fluctuant fortement, et, plus important encore, une très grande quantité d'électrons, protons et neutrons à énergies négatives. Si on adopte la nouvelle interprétation de la mécanique quantique, il n'y a pas le choix que de supposer que ces particules existent réellement.[...] Comme je l'ai dit, ce substrat est très dense, plus dense que n'importe quelle autre forme de matière. En fait, la matière comme elle est habituellement dénommée serait seulement une perturbation du substrat. Les mystérieuses « créations » et annihilations de particules matérielles pourraient maintenant être comprises [...].[37]

Cette hypothèse spéculative que les particules naissent et disparaissent à partir des changements d'état du substrat figure quasiment à l'identique dans la conclusion de l'article de 1954 :

> Les transitions entre les différentes formes possibles de la partie inhomogène et de type impulsionnel de la solution, combinée aux transitions entre les différents modes de vibration dans le reste du fluide, pourraient peut-être décrire les changements d'un type de particule à un autre. Ainsi, nous voyons qu'en ce qui concerne ses aspects qualitatifs, le modèle semble pouvoir expliquer certains des phénomènes qui expérimentalement se trouvent en réalité à l'échelle des très petites distances.[38]

Bohm poursuit son raisonnement et prédit que le milieu subquantique baigne a son tour dans un substrat situé à un niveau encore plus fondamental :

> Il est en fait plus que probable que même les particules du substrat ne puissent pas être indestructibles et inanalysables. Plutôt, il y a probablement un autre substrat en dessous (très probablement d'une nature qualitativement différente) et ainsi de suite *ad infinitum*. Ainsi, nous devrions avoir une série infinie de niveaux de lois qualitativement différentes.[39]

Bohm introduit ici de manière concomitante au milieu subquantique une notion fondamentale qui va rapidement s'imposer comme le ciment épistémologique de l'ICMQ : l'idée que la nature est organisée en une infinité de niveaux. Chacun de ces niveaux est régi par des lois particulières non réductibles les unes aux autres. Cette épistémologie, qui a également valeur d'ontologie, adopte le nom de « théorie des niveaux d'organisation de la nature ».

37. Bohm, David Bohm à Évry Schatzman.
38. « The transitions between different possible forms of the inhomogeneous pulse-like part of the solution, combined with transitions between various modes of vibration in the rest of the fluid, could perhaps describe changes from one type of particle to another. Thus, we see that at 1east in its qualitative aspects, the model seems to have possibilities for explaining some of the kinds of phenomena that are actually found experimentally at the level of very small distances.» Bohm et Vigier, « Model of the Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations », 216.
39. Bohm, David Bohm à Évry Schatzman.

5.2.3 | La rupture épistémologique de Vigier

La théorie des niveaux d'organisation de la nature proposée par Bohm est une méthode générale qui permet de penser la dialectique entre hasard et causalité dans la perspective d'un dépassement du déterminisme laplacien. Bien avant la démonstration de la règle de Born, Bohm l'évoque déjà en 1951 dans sa correspondance avec Schatzman et Vigier (voir la section 2.2.1 page 64). Nous avions déjà remarqué que l'influence de *Matérialisme et empiriocriticisme* de Lénine est manifeste, en particulier la thèse du caractère à la fois relatif et absolu de la connaissance. Contre le positivisme qui réduit la connaissance en un ensemble de sensations, Lénine réaffirme l'objectivité des lois de la nature. Cependant, ces lois ne sont pas pour autant éternelles, c'est-à-dire qu'au fur et à mesure du progrès, ces connaissances vont être ajustées et corrigées :

> Le fait qu'à tel ou tel moment, dans telle ou telle condition, nous avons avancé dans notre connaissance de la nature des choses au point de découvrir l'alizarine dans le goudron de houille ou de découvrir des électrons dans l'atome est historiquement relatif ; mais ce qui est certain, c'est que toute découverte de ce genre est un progrès de la « connaissance objective absolue». En un mot, toute idéologie est historiquement relative, mais il est certain qu'à chaque idéologie scientifique (contrairement à ce qui se produit, par exemple, pour l'idéologie religieuse) correspond une vérité objective, une nature absolue. Cette distinction entre la vérité absolue et la vérité relative est vague, direz-vous. Je vous répondrai : elle est tout juste assez « vague» pour empêcher la science de devenir un dogme au mauvais sens de ce mot, une chose morte, figée, ossifiée ; mais elle est assez « précise» pour tracer entre nous et le fidéisme, l'agnosticisme, l'idéalisme philosophique, la sophistique des disciples de Hume et de Kant, une ligne de démarcation décisive et ineffaçable.[40]

Bohm reprend en effet à son compte l'idée que chaque niveau décrit objectivement la réalité extérieure, mais qu'en raison de leur nombre infini, la connaissance ne peut pas être complète. Il faut remarquer que Vigier et Schatzman se montrent peu réceptifs lorsque Bohm leur présente pour la première fois la théorie des niveaux. Il semble aux deux Français que Bohm applique un peu trop littéralement les textes de Lénine :

> En procédant ainsi, nous nous attendons à trouver qu'est ce qui est entre les particules, quel champ est réellement présent. En poursuivant jusqu'à la prochaine approximation, nous espérons qu'il sera possible d'écrire un terme non linéaire dans l'équation du mouvement, et d'obtenir, par exemple, une approximation non linéaire de l'équation de Schrödinger.
>
> Comme vous le voyez, notre approche est très différente de la vôtre. Nous avons peut-être tort, mais nous ne sommes pas d'accord avec votre

40. Lénine, *Matérialisme et Empiriocriticisme*, 139.

> idée des différents niveaux de réalité. Il nous semble qu'il s'agit d'une interprétation formelle de la célèbre phrase de Lénine dans *Matérialisme et Empiriocriticisme*, au sujet des différents niveaux de réalité. [...]
>
> L'analogie avec les oscillations du plasma semble intéressante, mais ne devrait pas être poussée trop loin.[41]

Schatzman se réfère ici à la célèbre phrase de Lénine pour qui « l'électron est aussi inépuisable que l'atome, la nature est infinie, mais elle existe infiniment ; et cette seule reconnaissance catégorique et absolue de son existence hors de la conscience et des sensations de l'homme distingue le matérialisme dialectique de l'agnosticisme relativiste et de l'idéalisme.»[42] Schatzman adopte une attitude plus gradualiste pour expliquer le progrès de la connaissance, qui procède davantage en les améliorations successives d'un modèle fondamental. Dans le cadre de l'ICMQ, il s'agit d'identifier dans un premier temps les différentes interactions et leurs champs respectifs pour en déduire dans un second temps les lois du mouvement et enfin ajouter de la complexité par l'introduction de termes non linéaires. Schatzman décrit une approche asymptotique de la vérité, par une série d'approximations successives. La théorie des niveaux, au contraire, introduit l'idée que les théories successives reposent sur des postulats radicalement différents, que l'on qualifierait d'incommensurables dans le cadre de l'épistémologie de Kuhn.

Vigier change cependant d'opinion et se rallie à la vision de Bohm, probablement convaincu lors de leurs discussions pendant son séjour au Brésil à l'été 1953. Il n'y a aucun doute quant au changement d'attitude de Vigier puisqu'il reprend explicitement la théorie des niveaux dans sa thèse et la défend dans ses écrits et prises de parole militantes au PCF. Le 1er mars 1954, *La Pensée* organise un colloque sur le thème « Lénine philosophe et savant». Eugène Aubel, professeur à la Sorbonne, ouvre la discussion en rappelant l'importance de *Matérialisme et Empiriocriticisme* pour le physicien marxiste qui souhaite s'élever contre « cette conception [celle de Copenhague] inadmissible, car elle constitue un aveu d'impuissance, un manque de foi dans l'homme, un refus d'admettre cette objectivité des lois de la nature par laquelle [...] Lénine nous donne des arguments.»[43] À l'occasion de ce colloque, c'est à Vigier que revient l'honneur d'expliquer l'actualité de l'ouvrage de Lénine pour la physique moderne. Une partie de son intervention est consacrée au rapport entre la causalité et le hasard. Vigier y expose alors l'ICMQ dans la perspective de la théorie des niveaux d'organisation de la nature qu'il oppose au déterminisme laplacien et à l'idéalisme de Copenhague :

> Dans les discussions que nous avons à l'heure actuelle avec l'École de Copenhague, je pense que c'est un point sur lequel il faut insister et je vou-

41. Évry Schatzman, Évry Schatzman à David Bohm, 20 février 1952, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.
42. Lénine, *Matérialisme et Empiriocriticisme*, 273.
43. Eugène Aubel, «Discours d'ouverture», *La Pensée* 57 (1954) : 37-38.

> drais exposer devant cette assistance une théorie que nous essayons de développer avec David Bohm, théorie qui constitue à mon avis une illustration du matérialisme dialectique et que nous proposons de substituer aux conceptions classiques.
>
> Cette théorie repose sur la notion de niveau d'organisation de la matière. Au niveau macroscopique, c'est-à-dire au niveau des corps tels qu'ils nous apparaissent immédiatement, c'est la mécanique classique qui serait valable ; au niveau microscopique, ce serait la mécanique ondulatoire. Et nous supposons qu'il y a une infinité de niveaux avec des mécaniques correspondantes. La notion de niveau ne serait du reste pas nécessairement liée aux dimensions des corps : elle pourrait être liée à leur complexité. Un assemblage compliqué de particules ne se comporte pas comme une superposition de particules individuelles. Nous en avons un exemple dans les problèmes de la vie, où il est clair que le protoplasme composé d'une masse d'acides aminés et de toutes sortes de combinaisons chimiques a des propriétés qui ne se réduisent pas aux propriétés chimiques de ses corps (propriétés de stabilité, d'auto-défense, etc.)... On ne détruit pas facilement une cellule. Les niveaux d'organisation seraient ainsi liés non seulement aux dimensions, mais aussi à la complexité, aux très fortes énergies, etc.. Dans chacun de ces niveaux, les lois déterministes seraient valables, mais ne seraient valables que pour le niveau considéré. Ainsi la mécanique déterministe que nous essayons de construire dans le cadre de l'interprétation causale de la théorie des quanta, applicable aux micro-objets, aux électrons, protons, etc., ne serait valable qu'au niveau considéré. Elle laisserait nécessairement de côté la richesse de la nature extérieure à ce qu'elle entreprend de décrire.[44]

Ainsi, tout en maintenant le principe de causalité, Vigier explique que la contradiction entre le nombre fini des connaissances et l'infinité de la matière introduit un élément d'inconnu à jamais irréductible. En conséquence , il ne peut pas exister de théorie finale au sens de Laplace. Cet inconnu se concrétise dans les lois physiques par l'introduction de phénomènes aléatoires, comme les fluctuations du fluide quantique. La tâche qui incombe aux physiciens est alors de lever ces inconnus, les uns après les autres, dans un labeur sans fin.

Vigier ne restreint pas la validité de la théorie des niveaux à la physique. En prenant un exemple issu de la biologie, il prétend proposer une épistémologie générale des sciences. D'ailleurs, son camarade et ami Jean Orcel, minéralogiste, la reprend à son compte pour l'appliquer dans le cadre des sciences de la Terre. Entre autres, Orcel insiste sur la dimension temporelle pour délimiter les niveaux entre eux. Il rappelle également que les différentes échelles de temps géologiques sont à l'origine des diffé-

44. Vigier, « Quelques problèmes physiques posés par les thèses de Lénine », 62.

rentes sous-disciplines des sciences de la Terre.[45]

La théorie des niveaux est d'essence anti-réductionniste puisque les lois d'un niveau particulier ne sont pas réductibles à celles d'un autre situé « au-dessus» ou « en dessous». Le domaine d'application de la théorie causale est les quanta, « laissant de côté la richesse de la nature extérieure à ce qu'elle entreprend de décrire», donc entre autres la gravitation. En conséquence, Vigier ne considère pas la mécanique classique comme une approximation d'une théorie plus générale. Dans un article publié en 1961 dans *la Pensée*, il précise qu'elle est au contraire une théorie vraie dans son domaine d'application :

> En effet, la mécanique classique est réellement valable dans son domaine, et il n'est pas vrai qu'on peut la considérer comme une limite de la mécanique quantique, car elle gouverne des propriétés objectives des corps ; lorsque je rassemble suffisamment d'atomes ou de molécules pour constituer un corps macroscopique. Il y a une grosse différence entre le postulat de Bohr, lorsque h tend vers 0, et ce que l'on appelle « le théorème d'Ehrenfest» – qui explique comment on passe de la théorie des quanta à la mécanique classique.[46]

Il s'agit d'un renversement de perspective par rapport à l'approche gradualiste des connaissances évoquée précédemment, d'une science qui tend vers la vérité par une série ininterrompue d'améliorations successives de ses modèles théoriques : la mécanique classique est une approximation de la relativité pour les faibles valeurs de l'énergie devant mc^2, ainsi qu'une approximation de la mécanique quantique pour les grands ensembles de particules pour lesquels le passage à la limite continue est justifié. Dans l'organisation en niveaux, les théories s'emboitent les unes dans les autres autres *ad infinitum*. Vigier n'oublie pas de citer Pascal comme penseur de l'infini auquel la théorie des niveaux fait écho, en particulier à la célèbre *Pensée* intitulée « Disproportion de l'homme».[47]

En ce sens, le rejet initial de Vigier de la théorie des niveaux s'explique probablement par sa profonde contradiction avec son projet d'unification de la gravitation et des quanta qu'il poursuit alors à l'IHP à partir de 1951. Dans un sens inverse, une fois qu'il est convaincu par par Bohm, ce programme d'unification devient caduc. La conférence « Lénine philosophe et savant» se tient seulement neuf mois avant la soutenance de sa thèse en décembre. Après sa thèse, Vigier délaisse complètement ses tra-

45. Jean Orcel, «Structure en évolution et niveaux d'organisation de la matière. Importance des sciences minéralogiques», *La Pensée* 102 (1962) : 16-38 ; Pour une notice biographique de Jean Orcel, voir : Isabelle Gouarné, «ORCEL, Jean, François», sous la dir. de Claude Pennetier, *Le Maitron en Ligne*, 26 septembre 2013, http://maitron-en-ligne.univ-paris1.fr/spip.php?article147646.

46. Jean-Pierre Vigier, «Théorie des niveaux dialectique de la nature», *La Pensée* 99 (1961) : 43.

47. S'il avait formulé un commentaire, Pauli aurait probablement remarqué que cette référence à Pascal est cohérente, car, à travers ce refuge dans l'infini, seule la visée de l'apologétique change en substituant un dogme à un autre. Blaise Pascal, *Pensées*, Édition de Léon Brunschvicg (Paris : Librairie Hachette, 1980), 25.

vaux en relativité générale pour se concentrer uniquement sur la partie quantique de l'ICMQ, sans qu'il s'en explique publiquement (voir la section 3.4 page 116). L'explication de cet abandon par cette rupture épistémologique ne suffit sans doute pas, mais elle nous parait néanmoins plausible comme un facteur parmi d'autres.

5.2.4 | Le 9e Symposium de la Colston Research Society

Bohm et Vigier ont l'occasion de présenter plus en détail leurs récents développements de l'ICMQ à l'occasion du 9e Symposium de la Colston Research Society qui s'est déroulé à Bristol du 1er au 4 avril 1957. Depuis 1948, la Colston Research Society organise annuellement une série de symposia pluridisciplinaires. En 1957, le symposium met à l'honneur l'observation et l'interprétation en mécanique quantique. Cette édition rassemble dix-sept orateurs, philosophes et physiciens, parmi lesquels Karl Popper,[48] Paul Feyerabend, Léon Rosenfeld et Markus Fierz et trente-quatre participants au total (pour la liste complète des participants, voir la photo 5.1). En tant que première rencontre académique post-Seconde Guerre mondiale dédiée exclusivement aux fondements de la mécanique quantique, il constitue pour cette raison un moment important de l'histoire de la controverse sur l'interprétation de la mécanique quantique.[49]

En tandem, Bohm et Vigier présentent deux interventions complémentaires. Bohm se concentre sur les aspects physiques du milieu subquantique, tandis que Vigier revient pour sa part sur les différentes conceptions des probabilités dans les cadres de l'ICMQ et de l'ISMQ. Le symposium est également le lieu de vifs débats, en particulier avec Rosenfeld qui défend bec et ongles la complémentarité.

L'intervention de Bohm

Bohm intervient dans la seconde session du congrès présidée par Cecil Frank Powell, juste avant Rosenfeld, avec une présentation qui s'intitule « Une proposition d'explication de la mécanique quantique à l'aide de variables cachées à un niveau sub-mécanico-quantique».[50]

À partir de l'idée d'une structuration de la nature en niveaux, Bohm explique en

48. Absent du symposium, mais sa contribution est lue par Feyerabend.

49. À propos de cette neuvième édition et de son impact sur l'histoire des débats sur les fondements de la mécanique quantique, voir : Boris Kožnjak, «The missing history of Bohm's hidden variables theory : The Ninth Symposium of the Colston Research Society, Bristol, 1957», À paraitre, *Stud. Hist. Philos. Sci. B*, 2017, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1355219817300539.

50. David Bohm, «A proposed explanation of quantum theory in terms of hidden variables at a sub-quantum-mechanical level», in *Observation and Interpretation, a Symposium of Philosophers and Physicists*, Proceedings of the 9th Symposium of the Colston Research Society Held in the University of Bristol, April 1st–April 4th, 1957, sous la dir. de Stephan Körner (Londres : Butterworks Scientific publications, 1957), 33-40.

COLSTON SYMPOSIUM ON OBSERVATION AND INTERPRETATION 1957

Back Row (left to right) : R. Edgley, J. F. Nye, E. W. Bastin, D. J. O'Connor, R. Englman, J. O. Wisdom, G. Süssmann, S. Zienau, A. J. B. Cruickshank, N. L. Cooper, J. Cohen, S. F. Mason, E. Götlind, W. Mays, U. Öpik

2nd Row : R. H. Brown, G. Kneebone, F. Bopp, M. B. Hesse, P. Alexander, R. B. Braithwaite, W. C. Kneale, M. Scriven, D. M. Mackay, A. M. K. Müller, D. R. Cousin, E. H. Hutten, F. C. Frank, P. Feyerabend

3rd Row : P. T. Landsberg, L. Rosenfeld, J.-P. Vigier, D. Bohm, G. Ryle, C. Darwin, S. H. G. Barnett, S. Körner, A. J. Ayer, H. J. Groenewold, W. B. Gallie, D. H. Everett, M. Polanyi

FIG. 5.1: Participants au 9e Symposium de la Colston Research Society de 1957.« Observation and Interpretation» auquel Vigier et Bohm ont participé.[a]

a. Stephan Körner, éd., *Observation and Interpretation, a Symposium of Philosophers and Physicists,* Proceedings of the 9th Symposium of the Colston Research Society Held in the University of Bristol, April 1st–April 4th, 1957 (Londres : Butterworks Scientific publications, 1957), ii.

quoi les inégalités de Heisenberg ne sont probablement valables qu'à l'échelle quantique. Bohm évoque l'éventualité où les inégalités pourraient être violées pour des petites échelles de distance, toujours de l'ordre de 10^{-13}cm, qui requièrent de hautes énergies pour être scrutées. Il s'agit d'une idée qui figure déjà dans son article de 1952 et qu'il précise à partir de l'étude des mouvements browniens. Dans un tel mouvement, Bohm rappelle que Reinhold Fürth a montré qu'il existe une relation analogue à la relation d'indétermination de Heisenberg :

$$\delta x \delta p = ma \tag{5.9}$$

où m est la masse et a une constante. La quantité ma joue ici le même rôle que la constante de Planck dans les relations de Heisenberg. À partir de la relation de Fürth, Bohm remarque que les fluctuations du moment sont de l'ordre de $\Delta p = ma^{\frac{1}{2}}\Delta t^{-\frac{1}{2}}$. Elles prennent donc des valeurs infinies lorsque $\Delta t \to 0$. Toutefois, d'après le théorème d'équipartition de l'énergie, la valeur moyenne de l'énergie $\overline{E} = \frac{\overline{(\Delta p)^2}}{2m} = \frac{ma}{2\Delta t}$ doit être de l'ordre de grandeur de kT (où k est la constante de Boltzmann et T la température). Bohm s'appuie sur le théorème d'équipartition pour montrer qu'il existe théoriquement une limite haute des fluctuations du moment pour laquelle la relation $\delta x \delta p = ma$ demeure vraie. Au-delà de cette limite, le produit $\delta x \delta p$ pourrait être inférieur à ma. Bohm extrapole cette condition à la mécanique quantique et prédit que, pour des temps très courts, les relations de Heisenberg pourraient cesser d'être valables. Ainsi, l'indéterminisme exprimé par ces relations serait « objectif », mais uniquement valable à l'échelle de la mécanique quantique puisqu'il ne concernerait pas le niveau subquantique qui serait soumis à d'autres types de relations entre les variables dynamiques.

Bohm poursuit cette analogie avec le mouvement brownien classique pour expliquer la nature particulière des fluctuations du milieu subquantique. Il précise qu'il ne faut pas les concevoir comme des fluctuations des centres de gravité des particules qui leur conféreraient des trajectoires aléatoires, mais plutôt comme le type de mouvement brownien présent dans le phénomène d'opalescence critique, responsable entre autres de la couleur bleue du ciel.[51] C'est-à-dire quand un fluide chauffé dans un tube atteint sa température critique pour y être maintenu, il oscille entre les états liquides et gazeux pour n'être ni l'un ni l'autre. Un phénomène analogue au milieu subquantique pourrait, selon Bohm expliquer, la création et l'annihilation des particules par un changement perpétuel d'état de la matière.

51. Le phénomène est associé à des fluctuations de la densité par le polonais Marian Smoluchowski dans le cadre de ses travaux sur les mouvements browniens, dont il découvre en 1906 l'équation de diffusion indépendamment d'Einstein. Abraham Pais, *Subtle is the Lord : The science and the life of Albert Einstein* (Oxford : Oxford University Press, 1982), 100–104.

L'intervention de Vigier

Vigier intervient pour sa part juste après la lecture de la présentation de Popper lue par Feyerabend, dans une session présidée par Rosenfeld dédiée aux probabilités.[52] Vigier se concentre sur le statut des probabilités en mécanique classique et quantique.

Il accorde à Bohr et à son école d'avoir souligné l'importance du comportement statistique au niveau microscopique et d'en avoir établi les lois mathématiques. Pour autant, il rejette la conclusion de l'horizon indépassable des probabilités dans la compréhension du monde physique et associe cette interprétation des probabilités à celle de Richard von Mises.[53] En raison de son indéterminisme intrinsèque, Vigier qualifie le monde dépeint par von Mises de « roulette de casino géante ».[54] À l'inverse, en mécanique classique, selon les principes énoncés par Laplace, les lois physiques se résument aux lois de la causalité mécanique. Elles ont un caractère à la fois objectif et absolu. Dans l'interprétation classique, ou subjective selon la taxinomie de Popper, les probabilités mesurent alors le degré d'ignorance de l'observateur. En effet, si l'observateur possédait la totalité des informations caractérisant le système, il serait en principe possible de prédire à coup sûr le résultat d'un lancer de dé à 6 faces non pipé, et donc de se passer des probabilités. Vigier rejette dos à dos ces deux interprétations qu'il considère être les deux faces d'une même pièce, puisqu'elles posent, juge-t-il, chacune à leur manière une limite à la connaissance, ce qu'il ne peut accepter. La première en ne permettant pas de dépasser les probabilités, la deuxième en affirmant *a priori* qu'il existe un nombre fini de paramètres. Vigier emploie à ce propos la formule « d'indéterminisme laplacien » pour qualifier l'ISMQ.

Dans l'interprétation proposée par Vigier, les lois causales sont mélangées aux lois statistiques. Le milieu subquantique possède en effet ses propres lois déterministes, mais d'une nature différente de celles de la mécanique quantique, obligeant à les traiter comme un processus aléatoire, en l'occurrence markovien, à l'échelle de l'ICMQ. En résumé, trois échelles théoriques sont imbriquées les unes dans les autres. La mécanique quantique interprétée comme une théorie statistique, à la manière des Soviétiques Blokhintzev et Terletski. La théorie causale se propose comme une dynamique des particules quantiques individuelles. Enfin, le niveau subquantique dont les lois sont encore inconnues. Cette proposition de synthèse dialectique entre les lois causales et les lois statistiques différencie l'ICMQ à la fois di déterminisme laplacien et de l'indétermi-

52. Karl R. Popper, « The propensity interpretation of the calculus of probability, and the quantum theory », in Körner, *Observation and Interpretation, a Symposium of Philosophers and Physicists*, 65-70 ; Jean-Pierre Vigier, « The concept of probability in the frame of the probabilistic interpretation of quantum mechanics », in Körner, *Observation and Interpretation, a Symposium of Philosophers and Physicists*, 71-77.

53. À propos de l'influence de von Mises sur l'école de Copenhague, voir : Maria Carla Galavotti, « Operationism, probability mechanics and quantum », *Foundations of Science* 1 (1995) : 99-118.

54. Vigier, « The concept of probability in the frame of the probabilistic interpretation of quantum mechanics », 73.

nisme de l'ISMQ.

Rosenfeld en embuscade

Le 9e Symposium de la Colston Research Society s'est aussi caractérisé par la tension de certains de ses débats, en particulier ceux impliquant Bohm, Vigier et Rosenfeld, en raison des virulentes attaques de ce dernier envers les variables cachées. À n'en point douter, Rosenfeld, dans sa longue croisade contre l'hérésie quantique, est venu au congrès avec l'idée d'en découdre avec Bohm.[55] Des enjeux extra scientifiques entrent également en considération puisque Rosenfeld se réclame lui aussi du marxisme, bien que critique de la tradition léniniste. À travers les débats, c'est une dispute plus large autour de l'héritage marxiste qui transparait.

Rosenfeld intervient juste après Bohm lors de la deuxième session. Son propos consiste essentiellement en une critique point par point des variables cachées.[56] À son habitude, il nie l'existence d'un problème d'interprétation des fondements de la mécanique quantique. Ce « faux problème» serait en réalité un « produit de la désintégration de la philosophie mécaniste du dix-neuvième siècle.»[57] Selon Rosenfeld, les problèmes d'interprétation se posent uniquement lorsque les théories n'ont pas encore réalisé l'unicité entre le formalisme mathématique et son interprétation, ce qui était le cas de l'électromagnétisme pré relativiste où subsistait l'éther. Or, Rosenfeld avance qu'avec la complémentarité, la mécanique quantique a réalisé cette unicité et, qu'en conséquence, la question de l'interprétation de son formalisme est déjà résolue. L'introduction de variables cachées est donc un discours vide (*empty talk*). Rosenfeld critique également l'hypothèse du milieu subquantique et des prétendues limites de la mécanique quantique discutées par Bohm. Il les considère comme de la pure spéculation métaphysique, puisque sans aucune conséquence expérimentale. Quant aux insuffisances de la mécanique quantique évoquées par Bohm, comme le problème des infinis, il considère que « les critiques [de l'ISMQ] essayent d'exploiter la situation à leur avantage, mais c'est ici que le dilettantisme de leur approche est le plus visible.»[58]

Rosenfeld défend avec une telle véhémence l'orthodoxie que certains participants qui sont habituellement de son côté, comme Fierz, se sentent obligés de contrebalancer ses arguments qu'ils considèrent comme trop dogmatiques. Fierz critique en particu-

55. Kožnjak, « The missing history of Bohm's hidden variables theory : The Ninth Symposium of the Colston Research Society, Bristol, 1957», 6.

56. Léon Rosenfeld, «Misunderstandings about the foundations of quantum theory», in Körner, *Observation and Interpretation, a Symposium of Philosophers and Physicists*, 41-45.

57. « Historically, the false problem "scheinproblem" of intepreting a formalism appears as a short-lived decay-product of the mechanistic philosophy of the nineteenth century. So long the luminiferous aether was firmly believed to be an indispensable constituent of the universe, the search for a dynamical theory of light was real physical problem.» ibid., 41.

58. « The critics try to exploit this situation to their advantage, but it is just here that the dilettantism of their approach is most conspicuous.» ibid., 44.

lier la référence systématique de Rosenfeld à l'expérience pour invalider les variables cachées, en rappelant que, parfois, la théorie précède l'expérience, comme lors de la découverte des ondes de matière par de Broglie.[59] En réaction à l'attitude agressive de Rosenfeld, Vigier affine ses arguments et adapte sa stratégie afin de l'isoler. Il renverse habilement le procès en métaphysique en remarquant que puisque l'ICMQ est logiquement cohérente, ce que plus personne ne peut contester, l'existence ou non de lois qui contrediraient la théorie actuelle dans les domaines des hautes énergies doit être tranchée par l'expérience. Ainsi, réfuter *a priori* cette possibilité serait une attitude dogmatique.[60] Dans son exposé, il tient à préciser que « le modèle qu'[il] va présenter est n'évidemment pas le seul possible qui satisfasse ces conditions.[...] Il ne devrait pas être pris dogmatiquement, mais considéré comme un pas possible.»[61]

Les discussions consécutives à la sixième session dédiée à la prédiction et présidée par Braithwaite sont un autre temps fort du symposium. En les replaçant dans la perspective de l'histoire de la controverse sur l'interprétation de la mécanique quantique, ce débat demeure l'unique retranscription disponible d'une confrontation directe entre les tenants et les opposants de l'interprétation orthodoxe de cette époque. La forme débat possède l'avantage de mettre en relief les contradictions et les points de clivages entre les différents participants. Les actes du neuvième symposium de la Colston Research Society constituent pour cette raison un matériau d'une grande valeur pour l'historien des sciences. L'enjeu central du débat réside dans la place que doit accorder la théorie à l'observateur et, par extension, de la définition même du concept d'objectivité en physique, qui est cher pour les réalistes et les marxistes. Selon Rosenfeld, un énoncé scientifique n'a véritablement de sens, en physique quantique mais également en physique classique, que lorsqu'il fait référence à l'observateur, puisqu'il doit être testé par un individu particulier. De son côté, Vigier s'en tient à une définition tout à fait classique de l'objectivité des énoncés scientifiques, qui ne doivent donc aucunement faire référence à l'observateur ou au dispositif expérimental. Il intente un procès pour idéalisme à Rosenfeld, car, d'après lui, sa position impliquerait que les objets n'ont alors d'existence que s'ils sont observés. Il rétorque à Rosenfeld que, du temps des grands dinosaures, les lois de la mécanique quantique s'appliquaient, quand bien même aucun humain n'était présent pour les tester. En retour, Rosenfeld critique ce qu'il considère être une déformation caricaturale de ses propos et de leurs conséquences. Il prend soin de préciser qu'il ne conteste en aucun cas l'universalité des lois de la mécanique quantique. Cependant, il insiste sur le fait que ces lois sont nécessairement contextuelles, dans la mesure où elles prédisent les résultats attendus lors de

59. Körner, *Observation and Interpretation, a Symposium of Philosophers and Physicists*, 46.
60. Ibid., 50.
61. « Now the model I am going to present is evidently not the only possible which satisfies those conditions.[...] So, it should not be taken dogmatically but considered as a possible step.» Vigier, « The concept of probability in the frame of the probabilistic interpretation of quantum mechanics», 75.

situations expérimentales particulières. Ceci n'est pas contradictoire avec les principes d'universalité et d'objectivité, puisque les observateurs sont par principe interchangeables, sans altérer pour autant les prédictions. Penchant du côté de Bohm et Vigier, Feyerabend note toutefois que la position de Rosenfeld demeure problématique malgré ses précisions, car les énoncés portent autant sur les observateurs que sur les phénomènes observés, ce qui lui parait injustifié. En résumé, ce vif débat entre Vigier et Rosenfeld est un révélateur d'une différence de points de vue inconciliables et diamétralement opposés quant au sens du concept d'objectivité chez deux physiciens qui se réclament pourtant tous les deux du matérialisme philosophique. Alors que Vigier et Bohm souhaitent préserver une définition classique de ce concept dans le domaine des quanta, Rosenfeld le revisite pour sa part à l'aune des implications épistémologiques de l'ISMQ qu'il étend même, rétrospectivement, à la physique classique.

La participation au symposium était risquée pour Bohm et Vigier qui n'avançaient pas en terrain conquis. Toutefois, ils ont pu s'appuyer sur quelques-uns des participants hostiles aux idées de Copenhague, tels Feyerabend et Bopp. De plus, l'attitude agressivité de Rosenfeld s'est montrée contreproductive pour le desservir en s'attirant les critiques de ses soutiens habituels. Bohm et Vigier ont pu convaincre l'assemblée que leur interprétation est logiquement cohérente et que les points qu'elle met en avant – le domaine de validité de la mécanique quantique, l'objectivité, le déterminisme – sont dignes d'intérêt et méritent d'être discutés. Fierz reconnait même qu'il n'est pas possible de trancher entre les positions défendues par Bohm et Rosenfeld.[62] Néanmoins, ils ne sont pas parvenus à convaincre de la pertinence de ces questionnements du point de vue du physicien. La remarque suivante de Bopp résume assez bien l'état d'esprit de l'assemblée :

> La discussion a été jusqu'à présent insatisfaisante et ceci pour la raison suivante : nous disons que la théorie de Bohm ne peut pas être réfutée, ajoutant cependant que nous n'y croyons pas. La raison de cette situation indésirable semble être la suivante : la tâche de la physique a été définie en disant qu'elle prédit les résultats possibles des expériences. Mais ce que nous avons fait aujourd'hui était de prédire le développement possible de la physique – nous ne faisions pas de physique, mais de la métaphysique.[63]

Le commentaire de Bopp est représentatif du statut de la controverse sur les fondements de la mécanique quantique pendant les années 1950. La thématique commence à gagner en légitimité auprès de la communauté des physiciens, mais n'est cependant

62. Körner, *Observation and Interpretation, a Symposium of Philosophers and Physicists*, 47.

63. « The discussion has so far been unsatisfactory and this for the following reason : we say that Bohm's theory cannot be refuted, adding, however, that we don't believe in it. The reason fo this undiserable situation seems to be the following one : the task of physics has been defined by saying that it predicts the possible results of experiements. But what we have done today was predicting the possible development of physics – we were not doing physics but metaphysics» ibid., 51.

toujours pas considérée comme relevant du domaine de la physique en étant qualifiée péjorativement de métaphysique.

5.2.5 L'heuristique du milieu subquantique : la thermodynamique cachée des particules de de Broglie

Nous allons brièvement évoquer l'utilisation par de Broglie de l'hypothèse du milieu subquantique dans ce qu'il appelle la « thermodynamique cachée des particules» élaborée en 1961 et 1962.[64] Cet exemple illustre la capacité heuristique de l'hypothèse du milieu subquantique qui tempère le procès en métaphysique intenté à l'encontre des partisans de l'ICMQ, notamment par Rosenfeld. La thermodynamique cachée constitue une actualisation des travaux de 1947 et 1948 sur la mécanique ondulatoire dans lesquels de Broglie avait été amené à associer à chaque particule individuelle une température T reliée à la fréquence interne de la particule ν_c par $kT = h\nu_c$, où k est la constante de Boltzmann. De la même manière, de Broglie définit également une entropie à partir de l'action mécanique de la particule. Si ces grandeurs découlent logiquement des équations de la mécanique ondulatoire, l'interprétation physique de cette température et de cette entropie lui paraissait alors obscure. En effet, ces grandeurs sont des propriétés statistiques qui n'ont pas de signification pour la particule individuelle. Cependant, grâce à l'introduction du milieu subquantique par Bohm et Vigier, un « trait de lumière a jailli de [son] esprit.»[65] En reprenant une telle hypothèse dans sa thermodynamique de la particule individuelle, le milieu subquantique jouerait le rôle d'un « thermostat caché», qui échange continuellement de l'énergie avec la particule. La thermodynamique cachée des particules constitue le dernier grand programme de recherche initié par de Broglie avant qu'il ne prenne sa retraite de l'IHP en 1962.[66]

5.2.6 Une parfaite collaboration

Il est indéniable que Bohm est à l'origine des principales hypothèses physiques présentes dans l'article de 1954, en particulier celle du niveau subquantique, concomitante avec son idée d'une structuration de la matière en niveaux à laquelle Vigier s'est rallié. Toutefois, en nous penchant sur le style de la preuve, nous sommes autorisés à penser que Vigier n'en a pas moins joué un rôle important dans son établissement. À

64. Nous ne ferons qu'évoquer ce programme sans en proposer une analyse approfondie qui reste à réaliser.

65. Louis de Broglie, «La thermodynamique "cachée" des particules», *Ann. IHP A* 1, n° 1 (1964) : 9.

66. Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960)», 85.

la fin du chapitre précédent, nous avions qualifié la démarche de Vigier de rationnelle, en cela qu'elle privilégie les raisonnements qui ont une valeur générale et qui ensuite se déclinent vers le particulier (voir section 3.5 page 120). Nous avions différencié cette approche de celle de Bohm qui, au contraire, a tendance à fonder ses raisonnements à partir de cas concrets. La première démonstration par Bohm de la règle de Born par les collisions de molécules de dihydrogène, ou encore l'élaboration de la théorie des niveaux d'organisation de la nature à partir d'un problème précis en physique des plasmas, viennent compléter cette analyse. Or, l'esprit de la démonstration de 1954 correspond manifestement plus au style de Vigier qu'à celui de Bohm. Sa validité est générale puisqu'elle n'émet aucune condition sur le type de particules (électron, proton, voire atome) et les hypothèses sur la nature des fluctuations sont minimales. Ces éléments appuient selon nous l'idée que la contribution de Vigier a été essentielle à l'établissement de la preuve. En conclusion, la proposition de démonstration de la règle de Born par Bohm et Vigier témoigne de la bonne entente entre les deux physiciens grâce à leurs échanges mutuellement enrichissants et propices au développement de l'ICMQ.

Chapitre 6

Les particules à spin dans l'interprétation causale

Afin que l'ICMQ devienne parfaitement équivalente à ISMQ à la limite non relativiste, il lui restait à intégrer le moment cinétique intrinsèque, ou spin. En effet, à la différence de l'ISMQ dans laquelle tout opérateur hermitien est une observable, ce postulat n'existe pas dans l'ICMQ qui doit en conséquence intégrer les observables une par une et s'assurer que les résultats concordent.

Le spin est découvert par Samuel Goudsmit et George Uhlenbeck en 1925. Les deux physiciens l'assimilent à un nouveau degré de liberté de rotation de l'électron sur lui-même, d'où son nom, qui interagit avec un champ magnétique extérieur. Cette image est cependant rapidement abandonnée puisqu'elle implique que la vitesse de rotation de l'électron à l'équateur est supérieure à celle de la lumière, en contradiction avec le principe de la relativité.[1] De plus, pour les particules de spin $\frac{1}{2}$ comme l'électron, une rotation complète pour le faire revenir à son état initial est équivalente à une rotation de deux tours complets dans l'espace tridimensionnel. Dès lors, les physiciens actent que le spin est une propriété purement quantique qui ne possède aucun équivalent classique. Ainsi, sa description dans le cadre de l'ICMQ pour en proposer une représentation dans l'espace tridimensionnel est loin d'être immédiate.

Deux équations permettent de décrire le spin, celles de Pauli et de Dirac. L'équation de Pauli, établie en 1927 est une extension de l'équation de Schrödinger dont les solutions sont des spineurs, objets mathématiques créés par Élie Cartan en 1913.[2] Au Brésil, Bohm, Tiomno et Schiller sont les premiers à s'attaquer à cette équation. Ils s'appuient sur le formalisme des angles d'Euler afin de décrire les mouvements de rota-

1. Sur la découverte du spin, voir : Mehra et Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 1*, 684–709.

2. Wolfgang Pauli, «Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons», *Zeitschrift für Physik* 43, n° 9 (1927) : 601-623.

tion.[3] Il faut préciser que Tiomno, que Bohm connait depuis Princeton lorsqu'il était encore étudiant en doctorat, n'est pas un partisan de l'ICMQ. Il s'intéresse à la théorie des variables cachées en tant qu'objet physique, mais sans pour autant en partager les fondements philosophiques concernant la causalité. Avec la démonstration de la règle de Born en collaboration avec Vigier, ce travail sur l'équation de Pauli constitue selon Bohm la plus importante contribution de l'ICMQ des années 1950.[4] Quelques mois plus tard, Takabayasi propose sa propre hydrodynamique dotée de mouvements de rotation interne qu'il propose d'assimiler au spin.[5] Avec Vigier, il en propose une nouvelle version en 1957.[6] Cette dernière se démarque des deux précédentes par l'introduction d'un nouveau formalisme, celui des « rotateurs», emprunté au Japonais Tadao Nakano.[7] Cet article est le premier cosigné par Takabayasi et Vigier, marquant par la même occasion le début de leur collaboration effective. Aussi, le formalisme des rotateurs sera à la base du modèle des particules, fruit du travail conjoint entre le groupe IHP, Bohm et Takabayasi et qui est le sujet principal du prochain chapitre.

Ces diverses approches aboutissent à des résultats qui sont, en dernière analyse, assez similaires. Ce n'est pas étonnant dans la mesure où le matériau d'origine, l'équation de Pauli, est identique. La formulation par les rotateurs se distingue toutefois, bien que les auteurs démontrent qu'elle est équivalente à l'hydrodynamique puisqu'elle se résume, en dernière analyse, en un changement de variables canoniques. Au lieu d'étudier l'ensemble de ces approches dans une analyse comparative qui aurait sans doute un intérêt, nous choisissons plutôt de nous focaliser sur une étude plus approfondie des travaux de Bohm, Tiomno et Schiller. Ce choix en particulier est motivé par deux raisons principales. En premier lieu, la structure argumentative de l'article effectue un lien permanent avec la théorie classique. Ce lien est favorisé entre autres par l'introduction des angles d'Euler pour décrire la rotation de l'électron sur lui-même. Dans la perspective de notre problématique, leur approche est celle qui permet le mieux de saisir la « mise équation du réalisme» et les difficultés inhérentes qui émergent en voulant retranscrire dans l'espace tridimensionnel des propriétés qui lui sont plus « grandes». Deuxièmement, l'article a connu une certaine postérité parmi les continuateurs de l'ICMQ. Nous nous arrêterons en particulier sur les calculs numériques des trajectoires réalisés dans les années 1980 par Christopher, Peter Holland et Antonios

3. David Bohm, Ralph Schiller et Jayme Tiomno, «A Causal Interpretation of the Pauli Equation (A)», *Supplemento al Nuovo Cimento*, n° 1 (1955) : 48-66 ; David Bohm et Ralph Schiller, «A Causal Interpretation of the Pauli Equation (B)», *Supplemento al Nuovo Cimento*, n° 1 (1955) : 67-91.

4. Freire Jr., *The Quantum Dissidents*, 43–44.

5. Takehiko Takabayasi, «The Vector Representation of Spinning Particle in the Quantum Theory, I», *PTP* 14, n° 4 (1955) : 283-302.

6. Takehiko Takabayasi et Jean-Pierre Vigier, «Description of Pauli Matter as a Continuous Assembly of Small Rotating Bodies», *PTP* 18, n° 6 (1957) : 573-590.

7. Tadao Nakano, «A Relativistic Field Theory of an Extended Particle, I», *PTP* 15, n° 4 (1956) : 333-368.

Kyprianidis. Bien que ces travaux prennent place dans un autre contexte, notamment en raison de l'interprétation du potentiel quantique par les auteurs en tant que potentiel d'information, nous avons tout de même considéré ces travaux pertinents à des fins didactiques. Ils permettent en effet de visualiser les trajectoires des particules, dotant ainsi aux équations du mouvement issues de l'ICMQ un contenu concret.

En fin de chapitre, nous aborderons brièvement la représentation hydrodynamique de l'équation relativiste de Dirac de 1928 par Takabayasi et le groupe IHP.

6.1 Le modèle par les angles d'Euler de Bohm, Tiomno et Schiller

Avant d'entrer dans l'analyse des deux articles de Bohm, Tiomno et Schiller, précisons préalablement qu'ils ne brillent pas toujours par la clarté de leurs explications. D'une part, l'argumentation est parfois obscure, sinon maladroite. D'autre part, les articles comportent un certain nombre d'erreurs, certes mineures (mauvais facteur, oublis de potentiels dans les formules, etc.), mais qui peuvent tout de même nuire à la compréhension. Aussi, le choix des notations porte parfois à confusion, comme la phase de l'onde notée S et le vecteur de spin noté $\boldsymbol{S}$, ou alors lorsque deux systèmes différents de coordonnées sont utilisés dans la même équation. Les erreurs ne sont délibérément pas reproduites afin de faciliter la compréhension, mais sont toutefois signalées en notes de bas de page. Dans cette même volonté de clarifier les raisonnements, les notations et appellations standards de la mécanique quantique sont parfois utilisées quand nous l'avons jugé nécessaire. En particulier, nous introduisons les notations des groupes ($\mathrm{SU}(2)$, $\mathrm{SO}(3)$) absentes des articles originaux.[8] Bohm, Tiomno et Schiller partent donc de l'équation de Pauli de 1927 :

$$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}(\boldsymbol{\nabla} - ie\frac{\boldsymbol{A}}{c})^2\Psi + \phi\Psi + \frac{e\hbar}{2mc}(\boldsymbol{\sigma}\cdot\boldsymbol{B})\Psi \tag{6.1}$$

où $\boldsymbol{A}$ est le potentiel vecteur électromagnétique, ϕ le potentiel scalaire, le vecteur $\boldsymbol{\sigma}$ est le vecteur de Pauli dont les composantes sont les trois matrices de Pauli $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ et $\boldsymbol{B}$ le champ magnétique.[9] La densité ρ du fluide et son courant $\boldsymbol{j}$ sont définis par les

8. En plus des articles originaux, nous appuyons notre analyse sur les deux références suivantes qui en reprennent certains des développements mathématiques : Holland, *The Quantum Theory of Motion*, 379–423 ; Christopher Dewdney, «Calculations in the Causal Interpretation of Quantum Mechanics», in *Quantum Uncertainties : Recent and Future Experiments and Interpretations*, sous la dir. de William M. Honig, David W. Kraft et Panarella Emilio (Plenum Press, 1987), 19-40.

9. Les matrices de Pauli sont les générateurs du groupe de rotation $\mathrm{SU}(2)$ décrivant les particules de spin $\frac{1}{2}$ à la limite non relativiste. Un choix possible de ces matrices que l'on retrouve communément dans la littérature est : $\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, $\sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$, $\sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$

relations :[10]

$$\begin{cases} \rho = \Psi^\dagger \Psi \\ \boldsymbol{j} = \frac{\hbar}{2mi}(\Psi^\dagger \boldsymbol{\nabla} \Psi - \Psi \boldsymbol{\nabla} \Psi^\dagger) - \frac{e}{mc}\boldsymbol{A}\Psi^\dagger\Psi \end{cases} \tag{6.2}$$

Comme le courant est par définition le produit de la densité par la vitesse $\boldsymbol{j} = \rho \boldsymbol{v}$, il vient :

$$\boldsymbol{v} = \frac{\hbar}{2mi}\frac{(\Psi^\dagger \boldsymbol{\nabla} \Psi - \Psi \boldsymbol{\nabla} \Psi^\dagger)}{\Psi^\dagger \Psi}) - \frac{e}{mc}\boldsymbol{A} \tag{6.3}$$

Cependant, ces deux grandeurs n'ont pas de signification physique immédiate et sont insuffisantes en l'état pour caractériser entièrement le système. La raison tient à la forme que prend la solution Ψ qui n'est pas une onde, mais un spineur à deux composantes $\begin{pmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a+ib \\ c+id \end{pmatrix}$ dans lequel Ψ_a et Ψ_b sont des nombres complexes. Un spineur peut être vu comme vecteur à deux dimensions de composantes complexes. Il code ainsi quatre informations (a, b, c, d), ou degrés de liberté, indépendants. Ainsi, une particule de spin $\frac{1}{2}$ évolue dans un espace de dimensions $\mathbb{R}^3 \times \mathrm{SU}(2)$ (déplacement + rotation). La procédure de séparation des parties réelle et imaginaire employée jusqu'à présent n'a donc ici pas de sens.

La tâche qui incombe aux physiciens est de transposer adéquatement les propriétés des spineurs dans l'espace tridimensionnel afin de doter à l'équation de Pauli une signification physique au sens de l'ICMQ. Cependant, les quatre degrés de liberté du spineurs ne sont pas représentables dans l'espace tridimensionnel à trois degrés de liberté. En particulier, la propriété la plus remarquable des spineurs est leur symétrie 4π, contre 2π pour les rotations décrites par $\mathrm{SO}(3)$.[11] La description du spin dans l'espace euclidien ressemble fortement à résoudre la quadrature du cercle. Dans théorie de Pauli, le spin apparait comme une contribution au moment cinétique total qui s'ajoute au moment cinétique orbital $m\rho(\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{v})$ (la rotation de l'électron autour du noyau). Le spin d'une particule est donné par :

$$\frac{\hbar}{2}\int \Psi^\dagger \boldsymbol{\sigma} \Psi \mathrm{d}\boldsymbol{x} \tag{6.4}$$

L'expression $\frac{\hbar}{2}\Psi^\dagger \boldsymbol{\sigma} \Psi$ sous l'intégrale peut donc s'interpréter comme une densité de

10. Dans l'article, la masse au dénominateur n'est pas reportée dans le second terme $\frac{e}{mc}\boldsymbol{A}\Psi^\dagger\Psi$ de l'expression du courant qui se répercute sur celle de la vitesse tout au long de l'article. Aussi, le potentiel scalaire ϕ disparait des équations. Bohm, Schiller et Tiomno, « A Causal Interpretation of the Pauli Equation (A)», 51.

11. Mathématiquement, $\mathrm{SO}(3)$ et $\mathrm{SU}(2)$ ne sont homéomorphes que localement, mais pas globalement.

spin. La quantité de spins dans un élément de volume ΔV est alors :

$$\boldsymbol{S} = \frac{\hbar}{2}\Psi^\dagger \boldsymbol{\sigma} \Psi \Delta V \tag{6.5}$$

Le nombre de particules dans un élément de volume étant $\Delta N = \rho \Delta V = \Psi^\dagger \Psi \Delta V$, le spin par particule est donc :

$$\boldsymbol{s} = \frac{\boldsymbol{S}}{\Delta N} = \frac{\hbar}{2}\frac{\Psi^\dagger \boldsymbol{\sigma} \Psi}{\Psi^\dagger \Psi} \tag{6.6}$$

Comme le rapport de la densité sur le courant ne peut être supérieur à l'unité, le spin maximum par particule est $\frac{\hbar}{2}$, identiquement à l'ISMQ.

6.1.1 La description des rotations par les angles d'Euler

Dans l'interprétation proposée par Bohm, Schiller et Tiomno, l'électron est un solide indéformable dont le spin est assimilable à sa rotation sur lui-même. Bien qu'en raison de la violation du principe de relativité ce choix n'est pas entièrement satisfaisant, les auteurs précisent qu'il s'agit là « d'une abstraction comme lorsque l'on simplifie le traitement des atomes en les remplaçant par des masses ponctuelles quand bien même elles ont dans la réalité des dimensions finies.»[12] La valeur de cette comparaison est cependant assez limitée. Outre le problème de stabilité inhérent aux modèles étendus des particules chargées (voir la section 3.1 page 88), la ponctualité des particules élémentaires signifie également leur absence de structure interne, et donc leur indivisibilité. De plus, la dimension des particules n'est pas une observable. Ainsi, la signification de cette représentation abstraite des particules par la ponctualité est plus large que celle d'une approximation d'une réalité plus complexe, comme peut l'être la représentation d'une particule par une sphère. Il s'agit d'un choix théorique cohérent. D'ailleurs, en s'engageant dans la procédure de renormalisation, les physiciens ont choisi de conserver cette ponctualité aux prix d'introduire des artefacts mathématiques au premier abord suspects plutôt que d'y renoncer, illustrant ainsi leur attachement à ce choix théorique.

La solution la plus immédiate choisie par Bohm, Tiomno et Schiller pour modéliser cette rotation en trois dimensions est de passer par les angles d'Euler (θ,φ et ψ), avec $\theta \in [0, \pi]$, $\varphi \in [0, 2\pi]$ et $\psi \in [0, 2\pi]$, comme reproduits sur la figure 6.1. La rotation complète d'un solide dans l'espace tridimensionnel peut être décomposée en un produit de trois rotations successives $R_1(\psi) = \mathrm{e}^{i\sigma_z \frac{\psi}{2}}$ autour de l'axe Oz, $R_2(\theta) = \mathrm{e}^{i\sigma_x \frac{\theta}{2}}$ autour de Ox et $R_3(\varphi) = \mathrm{e}^{i\sigma_z \frac{\varphi}{2}}$ autour de Oz.

12. Bohm, Schiller et Tiomno, « A Causal Interpretation of the Pauli Equation (A)», 52.

Les auteurs appliquent cette rotation à un spineur standard unitaire $\beta_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ orienté selon l'axe $0z$ fixe dans l'espace. Ils précisent que le choix de cet axe initial est arbitraire, mais qu'il est judicieux dans la mesure où il permet une comparaison plus aisée avec l'ISMQ dans laquelle il est par convention l'axe de référence lors des mesures. La différence avec l'ISMQ est qu'avant la mesure la rotation interne de la particule n'a pas d'axe privilégié.

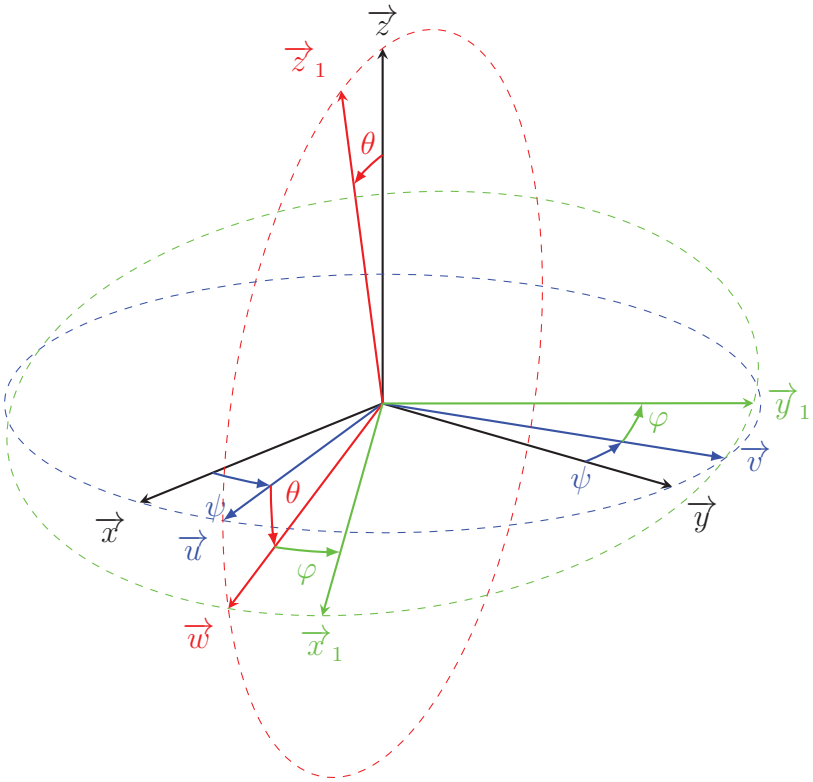


Fig. 6.1: Représentations des trois angles d'Euler θ, φ et ψ.

Par application des trois rotations successives, le spineur unitaire β_0 se transforme alors en β :

$$\beta = \begin{pmatrix} b_1 + ib_2 \\ b_2 + ib_3 \end{pmatrix} = R(\theta, \varphi, \psi)\beta_0 = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2)\, \mathrm{e}^{i(\psi+\varphi/2} \\ i\sin(\theta/2)\, \mathrm{e}^{i(\psi-\varphi/2} \end{pmatrix} \tag{6.7}$$

Les quatre paramètres b_i sont identifiés par les auteurs aux paramètres de Cayley-Klein, qui sont une représentation alternative aux angles d'Euler pour décrire le groupe de

rotation $\mathrm{SO}(3)$.[13] Selon ce nouveau spineur, la fonction d'onde de Pauli est donc :

$$\Psi = R\,\mathrm{e}^{i\frac{\psi}{2}} \begin{pmatrix} \cos(\theta/2)\,\mathrm{e}^{i\frac{\varphi}{2}} \\ i\sin(\theta/2)\,\mathrm{e}^{-i\frac{\varphi}{2}} \end{pmatrix} \tag{6.8}$$

où R est un réel.

En analogie avec la fonction d'onde $R\,\mathrm{e}^{i\frac{S}{\hbar}}$ solution de l'équation de Schrödinger, les auteurs donnent à la composante ψ des angles d'Euler l'expression $\psi(\boldsymbol{x},t) = -\frac{2Et}{\hbar} + \psi_0(\boldsymbol{x})$, où $\psi_0(\boldsymbol{x})$ est la valeur de la phase à $t = 0$. Cet angle exprime l'énergie moyenne de la particule.

6.1.2 | Les équations du mouvement

En remplaçant Ψ par son expression algébrique en fonction des angles d'Euler, la vitesse s'écrit :

$$\boldsymbol{v} = \frac{\hbar}{2m}(\boldsymbol{\nabla}\psi + \cos\theta\boldsymbol{\nabla}\varphi) - \frac{e}{mc}\boldsymbol{A} \tag{6.9}$$

La forme de l'expression suggère fortement que les variables $\cos\theta$ et $\boldsymbol{\nabla}\varphi$ puissent être identifiées aux paramètres de Clebsch. Il est bien connu de la mécanique des fluides que si le rotationnel est non nul, alors les équations du mouvement des variables $(\rho, \boldsymbol{v})$ ne peuvent pas être directement déduites des crochets de Poisson $\frac{\partial\rho(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} = \{H, \rho(\boldsymbol{r},t)\}$ et $\frac{\partial\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} = \{H, \boldsymbol{v}(\boldsymbol{r},t)\}$. Une solution consiste à passer par la paramétrisation alternative de Clebsch qui agrandit l'espace des phases en introduisant deux nouvelles variables canoniques (ξ, η). Avec ces variables, l'expression de la vitesse devient :[14]

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\nabla}S + \xi\boldsymbol{\nabla}\eta - \frac{e}{mc}\boldsymbol{A} \tag{6.10}$$

Dans le cadre de l'hydrodynamique quantique, l'utilisation des paramètres de Clebsch pour décrire le mouvement tourbillonnaire du fluide se retrouve une première fois chez Schönberg[15] et Takabayasi[16] dont les travaux ont inspiré Bohm, Tiomno et Schiller. À partir de la paramétrisation de Clebsch, Bohm, Tiomno et Schiller vont dégager les équations du mouvement en procédant par analogie avec un fluide classique chargé dont l'hamiltonien est :

13. Dans leurs articles, Bohm, Tiomno et Schiller jonglent entre les deux représentations. Voir l'annexe C.2 pour plus de détails.

14. Pour une explication détaillée de ce point, le lecteur peut se référer à l'ouvrage : Andrew Jackiw, *Lectures on Fluid Dynamics : A Particle Theorist's View of Supersymmetric, Non-Abelian, Noncommutative Fluid Mechanics and d-Branes* (New York City, NY : Springer, 2002), 6–21.

15. Mário Schönberg, « A non-linear generalization of the Schrödinger and Dirac equations », *Nuovo Cimento* VII, n° 5 (1954) : 674-682 ; Mário Schönberg, « Vortex Motions of the Madelung Fluid », *Nuovo Cimento* I, n° 4 (1955) : 543-580.

16. Takabayasi, « Remarks on the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures and on Relations between Linear Scalar Fields and Hydrodynamical Fields ».

$$H_c = \int \left[\frac{\rho}{2m} \left(\boldsymbol{\nabla} S + \xi \boldsymbol{\nabla} \eta - \frac{e}{c} \boldsymbol{A} \right)^2 + \rho e \phi + f(\rho) \right] \mathrm{d}\boldsymbol{x} \tag{6.11}$$

où $(\phi, \boldsymbol{A})$ sont les composantes scalaires et vectorielle du potentiel électromagnétique et $f(\rho)$ la pression. Dans ce fluide, les quatre équations du mouvement s'obtiennent à partir de l'équation de Hamilton pour les couples de variables conjuguées $(\rho, S$ et (ξ, η) :[17]

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}\rho \left(\boldsymbol{\nabla} S + \xi \boldsymbol{\nabla} \eta - \frac{e}{mc} \boldsymbol{A} \right) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}\rho\,(\boldsymbol{v}) = 0 \tag{6.12}$$

$$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial S}{\partial t} - \xi(\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{\nabla})\eta + \frac{\left(\boldsymbol{\nabla} S + \xi \boldsymbol{\nabla} \eta - \frac{e}{c} \boldsymbol{A} \right)^2}{2m} + \frac{e}{m}\phi + \frac{\partial f}{\partial \rho} = 0 \tag{6.13}$$

$$\frac{\mathrm{d}\xi}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + (\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{\nabla})\xi = 0 \tag{6.14}$$

$$\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + (\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{\nabla})\eta = 0 \tag{6.15}$$

L'équation de conservation du fluide rotationnel classique s'obtient alors par combinaison de (6.13) et (6.15) :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \xi \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\left(\boldsymbol{\nabla} S + \xi \boldsymbol{\nabla} \eta - \frac{e}{c} \boldsymbol{A} \right)^2}{2m} + \frac{e}{m}\phi + \frac{\partial f}{\partial \rho} = 0 \tag{6.16}$$

En analogie avec le fluide sans spin irrotationnel pour lequel l'énergie $E = \frac{\partial S}{\partial t}$, les auteurs attribuent ici l'énergie à l'expression $E = \frac{\partial S}{\partial t} + \xi \frac{\partial \eta}{\partial t}$.

Dans le fluide de Pauli, trois contributions H_T, H_Q et H_S distinctes apparaissent dans l'hamiltonien :

$$\begin{aligned} H_{Pauli} &= \int \left[\frac{\hbar^2}{2m} \left| \left(\boldsymbol{\nabla} - ie\frac{\boldsymbol{A}}{c} \right) \Psi \right|^2 + \phi |\Psi|^2 + \frac{e\hbar}{2mc} \Psi^\dagger \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{B} \Psi \right] \mathrm{d}\boldsymbol{x} \\ &= \underbrace{\int \frac{\hbar^2}{2m} \rho \left(\frac{\boldsymbol{\nabla}\psi}{2} + \cos\theta \frac{\boldsymbol{\nabla}\varphi}{2} - \frac{e}{c}\boldsymbol{A} \right)^2 \mathrm{d}\boldsymbol{x}}_{H_T} + \underbrace{\int \frac{\hbar^2}{8m} \frac{(\boldsymbol{\nabla}\rho)^2}{\rho} \mathrm{d}\boldsymbol{x}}_{H_Q} \\ &\quad + \underbrace{\int \mathrm{d}\boldsymbol{x} \left[\frac{\hbar^2}{8m} \rho ((\boldsymbol{\nabla}\theta)^2 + \sin^2\theta (\boldsymbol{\nabla}\varphi)^2) + \frac{\rho e}{mc} \boldsymbol{s} \cdot \boldsymbol{B} \right]}_{H_S} \end{aligned} \tag{6.17}$$

Le premier terme H_T peut aisément être comparé terme à terme avec celui du fluide rotationnel classique chargé tel que décrit précédemment. Le couplage du spin avec le

17. Pour une fonction $f(p, q, t)$ dans laquelle (p, q) est un couple de variables conjuguées, l'équation de mouvement de Hamilton est : $\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} = \{f, H\} + \frac{\partial f}{\partial t}$. Si f est une grandeur conservative comme l'hamiltonien H (constante le long d'une trajectoire), alors $\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} = 0$.

champ magnétique $\boldsymbol{B}$ figure dans H_S. Ce terme H_S fait également apparaitre une composante $Q_s = \frac{\hbar^2}{8m}\rho((\boldsymbol{\nabla}\theta)^2 + \sin^2\theta(\boldsymbol{\nabla}\varphi)^2)$ qui peut s'interpréter comme un potentiel spinoriel qui s'ajoute au potentiel quantique Q de l'équation de Schrödinger. Physiquement, ce potentiel signifie qu'y compris en l'absence d'un champ magnétique extérieur, les particules dotées d'un spin décrivent des trajectoires différentes de celles des particules sans spin. Les quatre équations du mouvement de Hamilton se déduisent alors par la même méthode que celles du fluide classique :[18]

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla}\cdot(\rho\boldsymbol{v}) = 0 \tag{6.18}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} - \xi(\boldsymbol{v}\cdot\boldsymbol{\nabla})\eta + \frac{m\boldsymbol{v}^2}{2} - \frac{\hbar^2}{2m}\frac{\nabla^2\rho^{\frac{1}{2}}}{\rho^{\frac{1}{2}}} + \frac{\hbar^2}{8m}\left[\frac{(\boldsymbol{\nabla}\xi)^2}{1-\xi^2} + (1-\xi^2)(\boldsymbol{\nabla}\eta)^2\right] + \frac{e}{mc}\boldsymbol{s}\cdot\boldsymbol{B} = 0 \tag{6.19}$$

$$\frac{\mathrm{d}\xi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\delta H_s}{\delta\eta} = 0 \tag{6.20}$$

$$\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}t} = \frac{\delta H_s}{\delta\xi} = 0 \tag{6.21}$$

En remarquant que dans H_s, le potentiel $Q_s = \frac{\hbar^2}{8m}\rho((\boldsymbol{\nabla}\theta)^2 + \sin^2\theta(\boldsymbol{\nabla}\varphi)^2) = \frac{\hbar^2}{2m}\partial_i s_j \partial^i s^j$, Bohm, Tiomno et Schiller en déduisent l'équation du mouvement du vecteur spin $\boldsymbol{s}$:

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{s}}{\mathrm{d}t} = -\frac{\boldsymbol{s}}{\rho}\times\partial^i(\rho\partial_i\boldsymbol{s}) + \frac{e}{mc}(\boldsymbol{s}\times\boldsymbol{B}) \tag{6.22}$$

Cette dernière équation montre qu'en plus du mouvement de précession classique de Larmor du spin produit de son couplage avec le champ magnétique $\boldsymbol{B}$, le potentiel Q_s ajoute une précession qui dépend de la divergence du vecteur spin. L'action de cette seconde précession est d'aligner les vecteurs spin des particules voisines.[19]

Enfin, l'équation d'Euler du fluide de Pauli s'obtient en prenant le gradient de l'équation de Hamilton-Jacobi et en tenant compte de (6.22) :

$$m\left(\frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{v}\cdot\boldsymbol{\nabla}\right)\cdot\boldsymbol{v} = m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = -\boldsymbol{\nabla}\left(\phi + Q + Q_s + \frac{e}{mc}\boldsymbol{s}\cdot\boldsymbol{B}\right) \tag{6.23}$$

L'équation Eulérienne de conservation du fluide de Pauli présente de grandes similitudes avec celle du fluide de Madelung. Ces deux diffèrent uniquement par les termes supplémentaires liés à la prise en compte des effets de spin (voir équation (4.3) page 130). Ainsi, à l'image du passage des équations de la mécanique classique à quantique par l'ajout d'un potentiel quantique Q au potentiel classique ϕ dans la théorie de

18. Le symbole δ représente la dérivée fonctionnelle, c'est-à-dire la dérivée d'une fonction par rapport à une autre fonction.
19. Bohm, Schiller et Tiomno, « A Causal Interpretation of the Pauli Equation (A)», 64–66.

Bohm de 1952 (voir la section 1.2.2 page 48), la prise en compte du moment cinétique intrinsèque se manifeste comme l'addition d'un nouveau potentiel Q_s, cette fois-ci lié au spin.

6.1.3 La symétrie 4π et la signification des règles de quantification du moment angulaire

La description du moment angulaire à l'aide des angles d'Euler introduit deux différences notables avec la représentation spinorielle habituelle.

La première concerne le sens et la direction relative des vecteurs entre eux dans l'une et l'autre des bases. Alors qu'en représentation spinorielle, les vecteurs propres $|z_+\rangle$ et $|z_-\rangle$ qui correspondant aux deux états possibles du système sont orthogonaux (respectivement $\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$ et $\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$), dans l'espace euclidien ils sont colinéaires, mais de sens opposés (selon Oz leurs coordonnées sont $\boldsymbol{s}_+ = \frac{\hbar}{2}\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix}$ et $\boldsymbol{s}_- = \frac{\hbar}{2}\begin{pmatrix}0\\0\\-1\end{pmatrix}$).

La seconde différence majeure concerne la symétrie $4n\pi$ (n entier) et son corolaire, le changement de signe de Ψ par une rotation de 2π, qui n'apparaissent pas explicitement dans le formalisme par les angles d'Euler. Ceci provient du fait que $\mathrm{SU}(2)$ couvre deux fois $\mathrm{SO}(3)$. Comme l'expliquent les auteurs, le signe du spineur est en fait encodé dans les phases $\frac{\psi+\varphi}{2}$ et $\frac{\psi-\varphi}{2}$.[20] Leur démonstration s'appuie sur la topologie de $\mathrm{SU}(2)$ qui doit être continue sur un chemin fermé, ce qui équivaut à ce que les paramètres de Cayley-Klein b_i doivent revenir à leurs valeurs initiales lorsque le chemin est parcouru en entier :[21]

> Considérons maintenant un circuit conduisant à une rotation de 2π autour d'un axe. Il est évident qu'à partir de la définition des b_i qu'une telle rotation nous emmène à partir d'un ensemble donné (b_1, b_2, b_3, b_4) de paramètres C.K. [Cayley-Klein] à l'ensemble correspondant $(-b_1, -b_2, -b_3, -b_4)$. Ainsi, même si le solide est revenu à son orientation originale, les paramètres C.K ne sont quant à eux pas revenus à leurs valeurs d'origine. En effet, de façon géométrique, cette rotation ne nous transporte qu'à mi-chemin autour de la surface hypersphérique sur laquelle nous devons rester dans l'espace à quatre dimensions des b_i. Comme dans le cas d'un grand cercle sur une sphère de l'espace à trois dimensions, il n'y a aucun moyen de déformer *continument* une telle courbe jusqu'à un point *tout en maintenant les points des extrémités fixes*. En conséquence, lorsque nous réalisons un circuit fermé dans le champ des orientations du solide ;

20. Bohm et Schiller, « A Causal Interpretation of the Pauli Equation (B)», 79–86.
21. Les auteurs raisonnent selon avec les paramètres de Cayley-Klein car, comme ils le remarquent, la valeur de $\cos\theta/2$ qui apparait dans le spineur peut être nulle ce qui rend les autres valeurs des paramètres indéterminées, un problème qui n'apparait pas avec les paramètres de Cayley-Klein (voir l'annexe C.2).

> si le solide tourne de 2π le long de ce circuit, et qu'ensuite le circuit est réduit en un point, la rotation totale qui s'opère le long de cette courbe devra demeurer égale à 2π, peu importe ô combien le circuit est devenu petit, de sorte que le champ des orientations du solide ne puisse pas être continu. D'un autre côté, si le circuit comporte deux rotations de 2π, nous sommes ramenés aux valeurs originales des paramètres C.K. ; et dans l'espace de ces paramètres, le chemin correspondant passe tout autour de l'hypersphère.[22]

À travers ce raisonnement quelque peu alambiqué, Bohm et Schiller illustrent que $\mathrm{SU}(2)$ et $\mathrm{SO}(3)$ sont localement homéomorphe, pour des rotations infinitésimales, mais qu'ils ne le sont pas globalement. Une manière simple de visualiser leur raisonnement est de comparer le parcours avec celui le long d'un ruban de Möbius, c'est-à-dire un ruban dont les extrémités sont jointes après une torsion d'un demi-tour (voir la figure 6.2). Dans un tel ruban, il faut effectivement réaliser deux tours complets afin de revenir à l'état initial, puisqu'un trajet d'un seul tour permet certes de revenir au même point de l'espace, mais sur la face opposée de celle de départ.

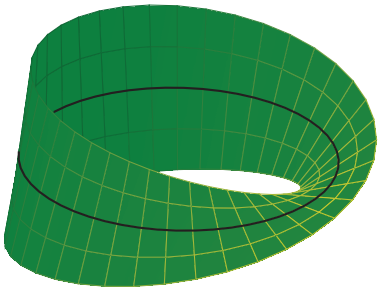


Fig. 6.2: Ruban de Möbius illustrant la symétrie 4π des spineurs

Comme Bohm et Schiller le remarquent, cette propriété topologique du groupe de rotation n'a pas d'incidence dans un système constitué d'une particule unique. Puisque les valeurs mesurées en mécanique quantique sont quadratiques, un changement de signe du vecteur de spin est *a priori* sans conséquence expérimentale. Par contre, ils pointent justement que ceci ne peut plus être négligé pour les systèmes composés de

22. « Let us now consider a circuit leading to a rotation of 2π about some axis. It is clear from the definition of the b_i that such a rotation carries us from a given set, (b_1, b_2, b_3, b_4) of C.K. parameters to the corresponding set $(-b_1, -b_2, -b_3, -b_4)$. Thus, even though the body has come back to its original orientation, the C.K. parameters have not come back to their original values. Indeed, geometrically speaking, this rotation carries us only half way around the hyperspherical surface on which we must remain in the four dimensional space of the b_i. As in the case of a great circle on a sphere in three dimensional space, there is no way to *continuously* deform such a curve to a point *while keeping the endpoints fixed*. As a result, when we make a closed circuit in the field of body orientations, if the body rotates through 2π along this circuit, then as the circuit is shrunk down to a point, the total rotation that takes place along this curve will have to remain equal to 2π, no matter how small the circuit becomes, so that the field of body orientations cannot be continuous. On the other hand, if the circuit carries us through two rotations of 2π, we are brought back to the original values of the C.K. parameters ; and in the space of these parameters, the corresponding path goes all the way around the hypersphere.» Bohm et Schiller, « A Causal Interpretation of the Pauli Equation (B)», 83.

plusieurs particules, puisqu'alors il faut prendre en considération les orientations relatives entre les différentes particules. La mise en évidence du signe des spineurs est réalisée une première fois en 1975 par Helmut Rauch et al. dans une expérience d'interférométrie de neutrons[23] d'après un protocole imaginé par Herbert J. Bernstein[24] ainsi que par Yakir Aharonov et Lenonard Susskind.[25]

À partir de ces considérations générales sur le groupe de rotation, Bohm et Schiller vont en déduire les règles de quantification du moment angulaire total dans l'atome d'hydrogène en fonction des conditions que doivent respecter les variations des angles ψ et φ. Ils partent de l'intégrale d'action (principe de Maupertuis) sur le circuit qu'ils intègrent le long de l'orbite de l'électron autour du noyau :

$$T = \oint \boldsymbol{p}\mathrm{d}\boldsymbol{x} \tag{6.24}$$

D'après l'expression obtenue précédemment pour la vitesse :

$$\boldsymbol{p}\mathrm{d}\boldsymbol{x} = \frac{\hbar}{2}(\boldsymbol{\nabla}\psi + \cos\theta\boldsymbol{\nabla}\varphi)\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{x} \tag{6.25}$$

avec $\boldsymbol{\nabla}\psi = \boldsymbol{\nabla}\psi_0(\boldsymbol{x})$. Puisque ni ψ_0, ni θ et ni φ ne possèdent de dépendance temporelle, les auteurs remplacent le $\mathrm{d}\boldsymbol{x}$ par un $\delta\boldsymbol{x}$ et peuvent ainsi reformuler l'intégrale d'action :

$$T = \oint \boldsymbol{p}\mathrm{d}\boldsymbol{x} = \frac{\hbar}{2}(\delta\psi + \cos\theta\delta\varphi) \tag{6.26}$$

Cette intégrale est l'équivalente de la condition de Bohr-Sommerfeld $\oint p_\theta \mathrm{d}\theta = nh$ de stabilité de l'atome d'hydrogène de la « vieille théorie quantique» à laquelle les effets liés au spin sont ajoutés.[26] Les auteurs déduisent de cette intégrale d'action les conditions $\Delta\psi = 2n_1\pi$ et $\Delta\varphi = 2n_2\pi$ (où n_1 et n_2 sont des entiers) de variations auxquelles doivent satisfaire les angles ψ et φ le long du circuit. Or, d'après les considérations sur la topologie de $\mathrm{SU}(2)$ présentées ci-dessus, il est aisé de montrer que n_1 et n_2 doivent également être des nombres pairs, ce qui est équivalent à ce que $\Delta\psi \pm \Delta\varphi$ doit aussi être un multiple pair de 2π.

En appliquant ces règles à l'atome d'hydrogène dont le moment angulaire total

23. Helmut Rauch et al., «Verification of coherent spinor rotation of fermions», *Phys. Let. A* 54, n° 6 (1975) : 425-427.

24. J. Bernstein Herbert, «Spin precession during interferometry of fermions and the phase factor associated with rotations through 2π radians», *Phys. Rev. Lett.* 18, n° 24 (1967) : 1102-1103.

25. Yakir Aharonov et Leonard Susskind, «Observability of the Sign Change of Spinors under 2π Rotations», *Phys. Rev.* 158 (5 1967) : 1237-1238.

26. La vieille mécanique quantique comprend la période qui s'étend de 1900, avec les travaux de Planck sur les corps noirs, à 1925, lorsque Heisenberg formule sa mécanique des matrices. Voir les chapitres V et VI de : Olivier Darrigol, *From c-Numbers to q-Numbers* (Berkeley et Los Angeles, CA : University of California Press, 1992), 85–149.

$k = (l + s)$ est la somme du moment angulaire orbital l et du spin s, l'état stationnaire correspond alors à $\Delta\psi = (2l + 1)$ et $\Delta\varphi = 2\pi$. Cette condition sur les variations des angles est donc équivalente à la quantification des niveaux d'énergie de l'ISMQ. Elle prend cependant un sens bien différent. Dans le cadre de l'ICMQ, elle exprime la condition d'existence d'un champ continu et bien défini de solides en rotation.

6.2 La théorie de la mesure appliquée au spin

Dans l'ICMQ, le spin évolue de manière continue au cours du temps comme le suggère l'équation (6.22), en contradiction apparente avec l'ISMQ dans laquelle il prend des valeurs discrètes, quel que soit l'axe selon lequel la mesure est réalisée. Pour expliquer cette différence, Bohm et Schiller emploient le même argument qu'à propos des autres variables : le spin mesuré correspond à l'interaction entre l'appareil et l'électron, il est donc différent du spin « réel » avant la mesure qui évolue pour sa part de manière continue. Les degrés de liberté (θ, φ et ψ) sont donc des variables cachées.[27] L'action du champ magnétique sur un système composé de particules dotées d'un spin va spatialement séparer le paquet d'onde en deux correspondant aux deux valeurs propres possibles du spin (*up* et *down*). Ainsi, l'ICMQ assure son équivalence avec l'ISMQ à la limite non relativiste puisque toutes les observables connues y sont représentées.

Avant de clore cette partie sur la représentation hydrodynamique de la théorie de Pauli, il faut mentionner les simulations des trajectoires dans le cadre de l'expérience de Stern et Gerlach de 1922 par Christopher Dewdney, Peter Holland et Antonios Kyprianidis à partir des équations établies par Bohm, Tiomno et Schiller.[28] Ces calculs de trajectoires sont rendus possibles grâce à l'arrivée des techniques de simulation computationnelle et de modélisation dans les laboratoires consécutives à la montée en puissance des calculateurs dans les années 1980. Comme nous l'avons annoncé en introduction, la présentation de ces simulations nous a semblé pertinente puisqu'elles permettent de visualiser concrètement les équations de mouvement, bien que plus de trente années plus tard le contexte dans lequel elles ont été effectuées ait évidemment changé. De plus, l'expérience de Stern et Gerlach possède un intérêt historique évident. Elle est la première à exhiber l'existence du moment cinétique intrinsèque. Plus précisément, son interprétation correcte n'a été possible qu'après la découverte du spin par Goudsmit et Uhlenbeck trois ans plus tard. L'expérience originale visait pour sa part

27. Bohm et Schiller, « A Causal Interpretation of the Pauli Equation (B) », 79–89.
28. Christopher Dewdney et Kyprianidis Antonios Holland Peter R., « What happens in a spin measurement ? », *Phys. Let. A* 119, n° 6 (1986) : 259-267 ; L'explication de l'expérience est également reproduite dans : Holland, *The Quantum Theory of Motion*, 404–416.

à corroborer le modèle atomique de Bohr-Sommerfeld en vigueur à l'époque.[29]

L'expérience consiste à faire traverser un faisceau d'atomes d'argent, électriquement neutres, dans un champ magnétique inhomogène. Le dispositif expérimental est représenté par la figure 6.3. On observe alors que l'action du champ magnétique dévie les atomes de leur trajectoire initiale, produisant deux faisceaux bien distincts. Selon la mécanique classique, les particules neutres n'auraient pas dû interagir avec le champ magnétique et auraient conservé une trajectoire rectiligne. Ainsi, l'expérience met en évidence une nouvelle propriété des particules, l'existence du vecteur spin $\boldsymbol{s}$ dont la projection ne prend que deux valeurs discrètes. L'intérêt du dispositif Stern et Gerlach est de corréler la répartition spatiale des atomes sur l'écran avec la projection du vecteur spin selon un axe prédéterminé.

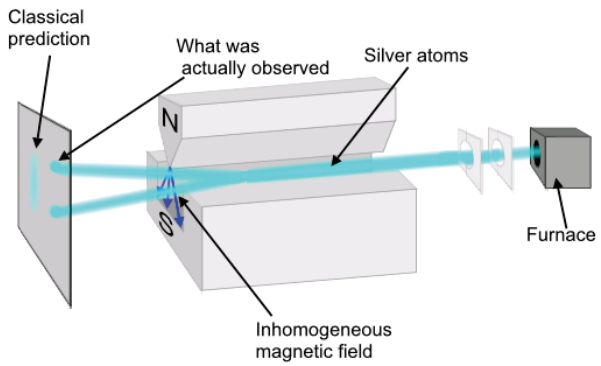


Fig. 6.3: Schéma du dispositif expérimental de l'expérience de Stern et Gerlach.[30]

Dans la suite, le repère est choisi de telle sorte que l'axe Oz soit parallèle à la direction nord-sud de la figure 6.3 et que le déplacement horizontal des noyaux se fasse selon l'axe Oy. Le champ magnétique $\boldsymbol{B}$ ne possède pour sa part qu'une composante unique suivant z et son expression algébrique est $B_0 + zB_0'$.[31]

Avant d'entrer en interaction avec le champ magnétique, les atomes d'argent évoluent librement. Suivant la théorie de la mesure établie par Bohm en 1952 (voir la section 1.2.2 page 51), leur fonction d'onde $\Psi(z,t)$ peut mathématiquement se décomposer sur la base des fonctions propres du spin, soit :

$$\Psi_0(z) = \Psi(z,0) = f(z)(c_+u_+ + c_-u_-) \tag{6.27}$$

Les coefficients complexes $c_+ = |c_+|\,\mathrm{e}^{i\frac{s_+}{\hbar}}$ et $c_- = |c_-|\,\mathrm{e}^{i\frac{s_-}{\hbar}}$ définissent la direction

29. À propos de la genèse de l'expérience de Stern et Gerlach, voir : Blai Pié i Valls, «L'experiment d'Stern i Gerlach en el seu context teòric : La història d'una reorientació» (thèse de doct., Université de Barcelone, 2015).

30. Theresa Knott, *Stern-Gerlach experiment*, Schéma Wikipedia, `https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stern-Gerlach_experiment.PNG`.

31. Plus précisément, il s'agit du développement de Taylor au premier ordre du champ avec $B_0' = \partial B_z/\partial z\ z\big|_{z=0}$

de la polarisation du flux d'électrons ainsi que les probabilités de mesure associées respectivement aux états propres $u_+ = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ et $u_- = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ qui vérifient $c_+^2 + c_-^2 = 1$. Il est également possible d'exprimer ces coefficients en fonction des valeurs initiales θ_0, ψ_0 et φ_0 des angles d'Euler :

$$\begin{cases} \cos^{-1}\theta_0 = (|c_+|^2 - |c_-|^2) \\ \psi_0 = \frac{s_+ + s_-}{\hbar} - \frac{\pi}{2} \\ \varphi_0 = \frac{s_+ - s_-}{\hbar} + \frac{\pi}{2} \end{cases} \tag{6.28}$$

Par hypothèse, toujours suivant le modèle de Bohm de la mesure, l'interaction est de type impulsive, c'est-à-dire que pendant une période T tous les potentiels qui ne sont pas liés au champ magnétique deviennent négligeables. En tenant compte de cette hypothèse, pendant toute la durée de l'interaction, l'équation de Pauli se réduit à :

$$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \frac{e\hbar}{2mc}(B_0 + zB_0')\Psi \tag{6.29}$$

En sortie du champ au temps T, le champ Ψ adopte la forme :

$$\Psi(z,T) = f(z)\left[c_+\,\mathrm{e}^{-i\frac{e}{2mc}(B_0+zB_0')T}\,u_+ + c_-\,\mathrm{e}^{+i\frac{e}{2mc}(B_0+zB_0')T}\,u_-\right] \tag{6.30}$$

Le système, hors de l'influence du champ magnétique, évolue alors de nouveau librement :

$$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2} \tag{6.31}$$

La fonction d'onde adopte alors la forme :

$$\Psi(z,t) = R_+ e^{i\frac{S_+}{\hbar}} c_+ u_+ + R_- e^{i\frac{S_-}{\hbar}} c_- u_- \tag{6.32}$$

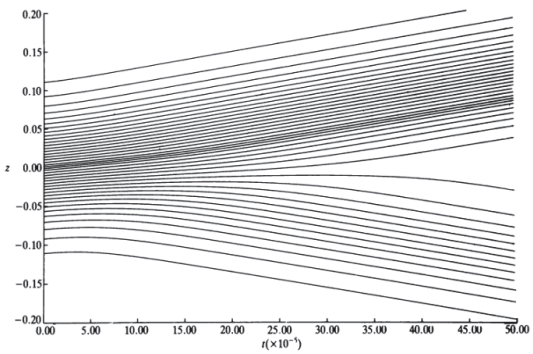
où les $R_\pm$ et $S_\pm$ sont des fonctions de z et de t réelles résultantes de l'interaction avec le champ magnétique. Les expressions exactes de ces deux fonctions n'a pas d'importance pour notre propos. Par contre, elles sont directement reliées aux angles d'Euler par les relations :

$$\begin{cases} \rho = R_+^2|c_+|^2 + R_-^2|c_-|^2 \\ \psi = \frac{1}{\hbar}(S_+ + S_- + s_+ + s_-) - \frac{\pi}{2} \\ \theta = 2\tan^{-1}\left(\frac{R_-|c_-|}{R_+|c_+|}\right) \\ \varphi = \frac{1}{\hbar}(S_+ - S_- + s_+ - s_-) + \frac{\pi}{2} \end{cases} \tag{6.33}$$

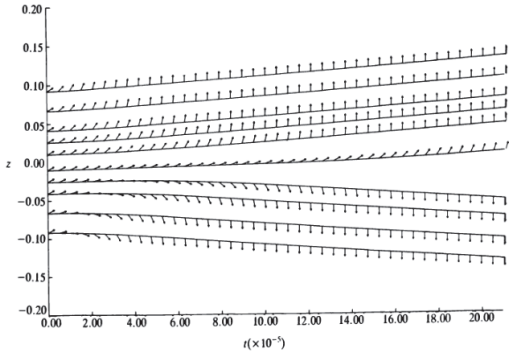
Pour résumer, l'interaction des atomes d'argent avec le champ magnétique corrèle la position sur y avec l'orientation du moment cinétique. En sortie, les paquets se séparent

spatialement selon y et cessent de se chevaucher. Le moment quantique dérivé de Q_s assure que la direction de la polarisation se maintient au cours du temps.

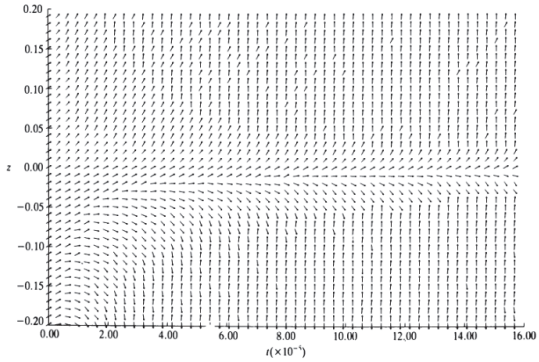
Les auteurs ont calculé les trajectoires des atomes d'argent pour différentes conditions initiales fixées par les coefficients de probabilités $c_\pm$. Sur la figure 6.4a ces trajectoires correspondent aux valeurs $|c_+|^2 = 0.75$ et $|c_-|^2 = 0.25$ fixant les angles d'Euler en $t = 0$ à $\theta_0 = \frac{\pi}{3}$, $\psi_0 = -\frac{\pi}{2}$ et $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$. La vitesse $\boldsymbol{v} = \frac{\hbar}{2m}(\frac{\partial\psi}{\partial z} + \cos\theta\frac{\partial\varphi}{\partial z})$ selon la direction $0z$ prend, après l'interaction, la valeur $v_T = \frac{e}{2mc}B_0'T$. Les évolutions au cours du temps des valeurs des angles θ, ψ et φ sont respectivement représentées par les figures 6.4b, 6.4c et 6.4d.



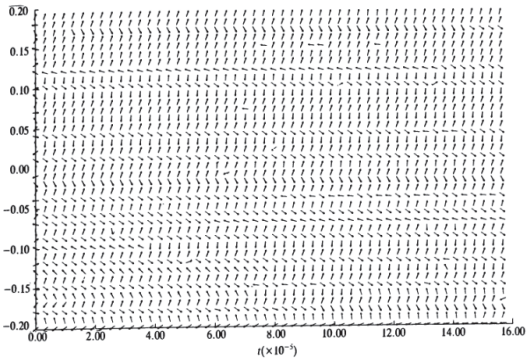
(a) Les trajectoires des atomes d'argent avec des conditions initiales $|c_+|^2 = 0.75$ et $|c_-|^2 = 0.25$.



(b) Évolution de l'angle θ.



(c) Évolution de l'angle ψ.



(d) Évolution de l'angle φ.

Fig. 6.4: Simulation numérique des trajectoires des particules dans l'expérience de Stern et Gerlach selon l'ICMQ réalisée par Dewdney, Holland et Kyprianidis en 1986.[32]

32. Christopher Dewdney et Kyprianidis Antonios Holland Peter R., « What happens in a spin measurement ? », *Phys. Let. A* 119, n° 6 (1986) : 259-267.

6.3 Le passage à la relativité par la représentation hydrodynamique de l'équation de Dirac

Avec l'équation de Pauli, la seconde équation qui prend en compte les effets liés spin est celle de Dirac établie l'année suivante en 1928 :[33]

$$\gamma^{\mu}(i\partial_{\mu} - eA_{\mu})\Psi = m\Psi \tag{6.34}$$

Ici, Ψ est un spineur à quatre composantes et les γ^{μ} les quatre matrices 4×4 de Dirac.

Cette équation est considérée comme la véritable théorie de l'électron puisqu'elle est covariante par transformation de Lorentz. La théorie de Dirac de l'électron va en réalité bien au-delà de la « simple» extension relativiste de l'équation de Pauli. D'une part, Dirac prédit l'existence théorique des antiparticules à partir des solutions à énergie négative. Initialement attribuées par Dirac au proton, ces solutions négatives se sont rapidement révélées correspondre à l'existence de positron e^{+}, antiélectron, qui lui est différent uniquement par sa charge positive. On attribue à Carl D. Anderson la découverte expérimentale du positron en 1932 pour laquelle il reçoit le prix Nobel en 1936. En outre, Dirac montre dans son article que le domaine d'application du formalisme spinoriel ne se restreint pas aux rotations, mais permet également de représenter le groupe de Lorentz.

Les partisans de l'ICMQ s'assignent rapidement la tâche de proposer une interprétation de l'équation de Dirac dans le cadre de l'hydrodynamique. D'ailleurs, Takabayasi s'attaque en premier lieu à cette équation plutôt qu'à celle de Pauli au début 1955 en envoyant ses résultats préliminaires aux éditeurs de *PTP* en février.[34] En 1956 et 1957, Takabayasi est ainsi le premier à fournir une représentation satisfaisante de l'équation de Dirac pour un électron isolé par le formalisme de l'hydrodynamique.[35] Les spécificités propres à l'équation de Dirac mises entre parenthèses, en particulier la fonction d'onde qui est un spineur à quatre composantes, l'esprit de la démonstration de Takabayasi demeure identique aux travaux en hydrodynamique quantique que nous avons présentés jusqu'à présent. Il s'agit toujours de déterminer les expressions adéquates du courant et de la vitesse et de substituer la fonction d'onde par un ensemble de variables tensorielles qui permettent une interprétation physique immédiate. Ces travaux pos-

33. Paul A. M. Dirac, «The Quantum Theory of the Electron», *Proc. R. Soc. A* 117, n° 778 (1928) : 610-624.

34. Takehiko Takabayasi, «Letter to the Editor : Relativistic Hydrodynamics Equivalent to the Dirac Equation», *PTP* 13, n° 2 (1955) : 222-224.

35. Takehiko Takabayasi, «Hydrodynamical description of the Dirac equation», *Nuovo Cimento* 3, n° 2 (1956) : 233-241 ; Takehiko Takabayasi, «Exposé n °3 des 11 décembre 1956 et 8 janvier 1957 : Relativistic hydrodynamics of the Dirac matter», *SLDB*, 1957,

sèdent un réel intérêt ne serait-ce par l'importance historique de l'équation de Dirac pour la physique. Nous faisons cependant le choix de ne pas entrer dans le détail de son analyse dans le cadre de l'ICMQ car, dans la perspective de notre problématique, nous considérons qu'ils n'apportent pas d'élément réellement nouveau par rapport à la complexité de l'appareil mathématique inhérente à l'équation originelle de Dirac.

L'équation est également au centre de l'attention du groupe IHP et plus largement de l'ensemble des physiciens de l'institut. Lochak souligne que pendant cette période, « il n'y avait guère que le concierge qui ne travaillait pas sur cette équation.»[36] Les séances du séminaire de physique théorique de Louis de Broglie discute régulièrement de la théorie de Dirac. Bohm et Takabayasi y participent d'ailleurs lors de leurs séjours à Paris, respectivement de l'automne 1955 au printemps 1956[37] et de l'automne 1956 au printemps 1959.[38] Bohm obtient un poste à l'université de Bristol après avoir séjourné deux ans au Technion de Haïfa (1955–1957). Grâce à cette proximité géographique, il peut aisément se rendre dans la capitale française et participer de temps à autre au séminaire de Broglie.[39] En principe, ce rapprochement géographique devrait permettre au groupe de collaborer plus intensément et d'accélérer le travail. Toutefois, Bohm n'est pas satisfait de la situation. Il considère ses voyages à Paris comme peu productifs, notamment en raison de l'investissement de Vigier dans ses activités militantes qu'il considère excessif, car il empiète d'autant sur le temps consacré à la recherche.[40] Ces critiques sont à mettre en perspective avec sa trajectoire personnelle, puisque Bohm rompt avec le marxisme aux environ de 1958. Il digère mal, coup sur coup, les révélations du rapport Khrouchtchev à propos des crimes de Staline et l'écrasement de la révolte populaire de Budapest par les chars soviétiques.[41]

36. Lochak, entretien avec l'auteur.
37. David Bohm, Georges Lochak et Jean-Pierre Vigier, «Exposé n°8 du 10 janvier 1956 : Interprétation de l'équation de Dirac comme approximation linéaire de l'équation d'une onde se propageant dans un fluide tourbillonnaire en agitation chaotique du type éther de Dirac (Partie 1)», *SLDB*, 1956, David Bohm et al., «Exposé n°15 du 20 mars 1956 : Interprétation de l'équation de Dirac comme approximation linéaire de l'équation d'une onde se propageant dans un fluide tourbillonnaire en agitation chaotique du type éther de Dirac (Partie 2)», *SLDB*, 1956,
38. Takabayasi, « Exposé n°3 des 11 décembre 1956 et 8 janvier 1957 : Relativistic hydrodynamics of the Dirac matter».
39. Peat, *Infinite Potential*, 174-177.
40. David Bohm, entretien avec Maurice Wilkins, 22 décembre 1986, AIP Oral History Interviews, https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/32977-6.
41. Freire Jr., *The Quantum Dissidents*, 51.

Chapitre 7

Le programme oublié : le modèle unifié des particules

À partir de 1957 et jusque dans la première moitié des années 1960, le principal chantier théorique du groupe IHP concerne l'étude de la structure interne des particules. En comparaison des autres travaux du groupe, ce programme de recherche est celui qui comptabilise la plus grande part de contributions publiées dans des revues internationales.[1]

Le nombre de contributeurs de l'ICMQ s'élargit sensiblement pendant cette période et l'expression de « groupe IHP » prend alors tout son sens.[2] Ces nouveaux acteurs sont Pierre Hillion, Maurice Kleman et, plus tardivement, Serge Depaquit. De plus, le poids relatif des contributions des différents physiciens est plus équilibré. Alors que jusqu'à présent l'essentiel des développements théoriques était l'œuvre principale de Vigier, Bohm et Takabayasi, ces jeunes physiciens vont se faire une place et apporter leurs sensibilités personnelles. En particulier, la thèse de doctorat de Halbwachs sur les fluides à spin est de première importance dans l'avancement théorique du modèle. De plus, le groupe s'ouvre davantage sur l'international, grâce notamment au séjour de Vigier au Japon en 1961 dans l'équipe de Yukawa à l'université de Kyoto. Cette ouverture va permettre d'enrichir considérablement la théorie. Entre autres, les physiciens vont commencer à utiliser la théorie des groupes mathématiques et s'approprier le modèle des particules de Sakata.

D'une certaine manière, ce programme de recherche permet à l'ICMQ de raccrocher le wagon de la physique de son temps. Jusqu'à présent, l'ICMQ semblait désespérément courir derrière des résultats acquis de longue date, avec comme unique perspective d'en proposer une interprétation alternative considérée plus satisfaisante du point de vue réaliste. Cet intérêt pour la physique de hautes énergies n'est pas nou-

1. Nous excluons les publications aux *CRAS* qui sont un format court et qui ont un processus particulier de validation par présentation par l'un des secrétaires perpétuels dont de Broglie fait partie.
2. Par facilité d'écriture, nous incluons dans ce chapitre au groupe IHP Bohm et Takabayasi.

veau. Déjà en 1954, Vigier mentionnait la crise rencontrée par la physique quantique à l'échelle intranucléaire et projetait l'avenir de l'ICMQ dans ce domaine. Vigier considérait cette crise comme le prix payé par l'ISMQ pour ses renoncements à une description objective et déterministe des phénomènes physiques (voir la section 3.1 page 88). Les critiques paraissaient cependant purement rhétoriques dans la mesure où elles ne s'accompagnaient d'aucune piste de recherche concrète, mis à part l'idée qu'il faille renoncer à l'aspect ponctuel des particules. Avec ce nouveau programme de recherche, le groupe IHP entend bien dépasser ce stade et orienter l'ICMQ vers des thématiques plus contemporaines et plus à même de convaincre la communauté des physiciens.

Ces travaux marquent un profond renouvellement de la démarche de l'ICMQ. D'une part, la théorie ne s'appuie pas cette fois-ci sur une théorie quantique préexistante. Les physiciens partent d'un nouveau modèle classique des particules qu'ils vont quantifier dans un second temps. Cette quantification est à l'origine du système de classification des particules qui attribue à chaque degré de liberté de rotation un nombre quantique. La méthode rappelle évidemment celle de Dirac avec sa nouvelle théorie classique de l'électron. L'autre nouveauté théorique est l'introduction des groupes mathématiques évoquée plus haut. La théorie renonce au formalisme classique *intuitif* pour devenir plus abstraite. Sur le plan de la théorie pure, les principaux accomplissements du modèle sont de recouvrir la loi empirique de Gell-Mann–Nishijima et de proposer un classement original des particules connues tout en prédisant l'existence de nouvelles. Ces deux tendances contraires, d'une part la volonté d'établir une théorie des particules compatible avec un certain réalisme et, d'autre part, l'emploi de procédures et d'outils jusque-là étrangers à l'ICMQ et réprouvés par ses partisans, mais justifiés par pragmatisme, créent inévitablement des tensions et des contradictions internes que les physiciens vont devoir surmonter par une interprétation adéquate de leur modèle. En tout état de cause, le modèle des particules interroge quant à son statut, entre rupture et continuité épistémologique.

Ce chapitre revient ainsi sur ce vaste programme de recherche oublié par l'historiographie, que l'on pourrait ranger aux côtés des autres tentatives antérieures à l'avènement du modèle des quarks en 1964. Notre étude s'appuie sur un large éventail de documents publiés de différentes natures (articles, comptes-rendus de séminaires, thèses de doctorat) qui sont autant de pierres constitutives d'un édifice jamais terminé. En effet, il n'existe pas de version achevée du modèle des particules issu de l'ICMQ dans le même sens que l'est, par exemple, la théorie des variables cachées de Bohm de 1952. Par-là, nous signifions qui est logiquement cohérente et se suffit à elle-même en tant que modèle. Il existe plusieurs versions du modèle, qui correspondent à autant de tentatives pour atteindre un même objectif. Afin de maintenir une argumentation la plus limpide possible, nous n'entrerons pas dans les détails de ces différentes versions. Le propos de ce chapitre est avant tout de présenter les idées directrices du modèle afin

de mieux cerner les ruptures mentionnées précédemment et ainsi de le situer dans l'histoire générale de l'ICMQ. Cette analyse permettra d'alimenter la discussion qui termine ce chapitre à propos de l'utilisation des concepts classiques dans l'ICMQ.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, nous allons préalablement brosser un rapide portrait de l'état d'avancement de la physique des hautes énergies de l'après-guerre jusqu'au début des années 1960. Cette étude nous aidera à mieux comprendre l'approche originale du groupe IHP et à déterminer comment elle se positionne par rapport à la physique de son temps. Nous aurons ainsi l'occasion de constater que, tout en maintenant son approche singulière, l'ICMQ reprend pour elle un certain nombre d'idées qui sont dans l'air du temps.

7.1 La physique des hautes énergies avant l'avènement du modèle des quarks

Dans l'après-guerre, les expérimentateurs, aidés de leurs accélérateurs à particules dont la puissance croît exponentiellement (le premier synchrocyclotron à Berkeley en 1946 accélère des protons à 600 MeV, le Cosmotron à Brookhaven en 1952 atteint les 3 Gev, le Bevatron de Berkeley à 6.2 GeV en 1954, 28 GeV au CERN PS en 1959) enregistrent de prodigieuses découvertes.[3] La liste des particules considérées comme élémentaires grandit d'année en année. Alors qu'en 1932, avec la découverte du neutron par Chadwick, le nombre de constituants fondamentaux de la matière connus se limite à trois particules (proton, neutron, électron), cette liste en comprend 15 en 1951, atteint la trentaine à la fin de la décennie et s'approche de la centaine dans la première moitié des années 1960. Pour qualifier cette prolifération, les physiciens emploient alors l'expression « zoo de particules ».[4]

Il devient alors de plus en plus urgent pour les physiciens d'établir un système de

3. Sauf précision supplémentaire de la source, les éléments rapportés dans cette section s'appuient sur : Andrew Pickering, *Constructing Quarks : A Sociological History of Particle Physics* (Chicago, IL : University of Chicago Press, 1984), 21–82 ; Nous sommes pleinement conscient du caractère controversé des thèses contingentistes de Pickering, emblématiques des Sociology of scientific knowledge (SSK). Elles sont discutées par Hacking dans son ouvrage passionnant, ainsi que par Gingras. D'ailleurs, Pickering modère ses positions une décennie plus tard. Cette mise en garde effectuée, nous considérons que l'ouvrage de Pickering constitue une référence en raison de sa riche documentation et l'excellente maitrise de la physique en jeu par l'auteur. Pour les références citées dans cette note, voir : Ian Hacking, *The Social Construction of What ?* (Cambridge, MA : Harvard University Press, 1999), 73–99 ; Andrew Pickering, *The Mangle of Practice : Time, Agency, and Science* (Chicago, IL : University of Chicago Press, 1995), 10 ; Yves Gingras, « The New Dialectics of Nature », *Social Studies of Science* 27 (1997).

4. Pour l'anecdote, Leon Lederman rapporte qu'a l'occasion d'une conférence, alors qu'il attend dans la file pour aller manger, il demande à Enrico Fermi, qui se trouve juste à côté de lui, ce qu'il pense de la découverte du kaon K_2^0. Celui-ci lui aurait répondu : « jeune homme, si je pouvais me souvenir du nom de toutes ces particules, j'aurais été botaniste. » Leon M. Lederman et Dick Teresi, *The God Particle : If the Universe Is the Answer, What Is the Question ?* (New York, NY : Dell Publishing, 1993), 15.

classification rationnel de toutes ces nouvelles particules. En 1953 et 1955, Tadao Nakano et Kazuhiko Nishijima[5] proposent une première loi empirique reliant différentes grandeurs conservatives entre elles. Cette loi sera redécouverte indépendamment par Murray Gell-Mann en 1956.[6] Ils expriment la charge Q en fonction de l'isospin I_3 et de l'hypercharge Y. Cette dernière est la somme du nombre baryonique B et d'un nouveau nombre quantique, la η-charge selon Nishijima ou l'étrangeté S selon Gell-Mann :

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}Y = I_3 + \frac{1}{2}(B + S) \tag{7.1}$$

Le terme « étrangeté » est introduit auparavant par Abraham Païs afin de caractériser certaines particules comme les kaons K et les lambdas Λ. Leur « étrangeté » provient du fait qu'elles sont des produits d'interactions dont les sections efficaces sont caractéristiques de l'interaction forte, mais dont les temps de désintégration sont typiques de l'interaction faible. L'étrangeté se comporte comme une charge et, à l'instar de la parité, se conserve dans l'interaction forte, mais pas dans l'interaction faible. L'isospin est, comme son nom le suggère, une grandeur vectorielle. Il est introduit en 1932 par Heisenberg en analogie avec le spin afin de traiter le proton et le neutron comme des particules d'une même famille, celle des nucléons. Il est également décrit par le groupe de symétrie $\mathrm{SU}(2)$. Sa projection est quantifiée sur son axe principal (I_3) dont la valeur différencie les particules d'une même famille (multiplet). Par exemple, les nucléons ont un isospin $\frac{1}{2}$ qui vaut $+\frac{1}{2}$ pour le proton et $-\frac{1}{2}$ pour le neutron.

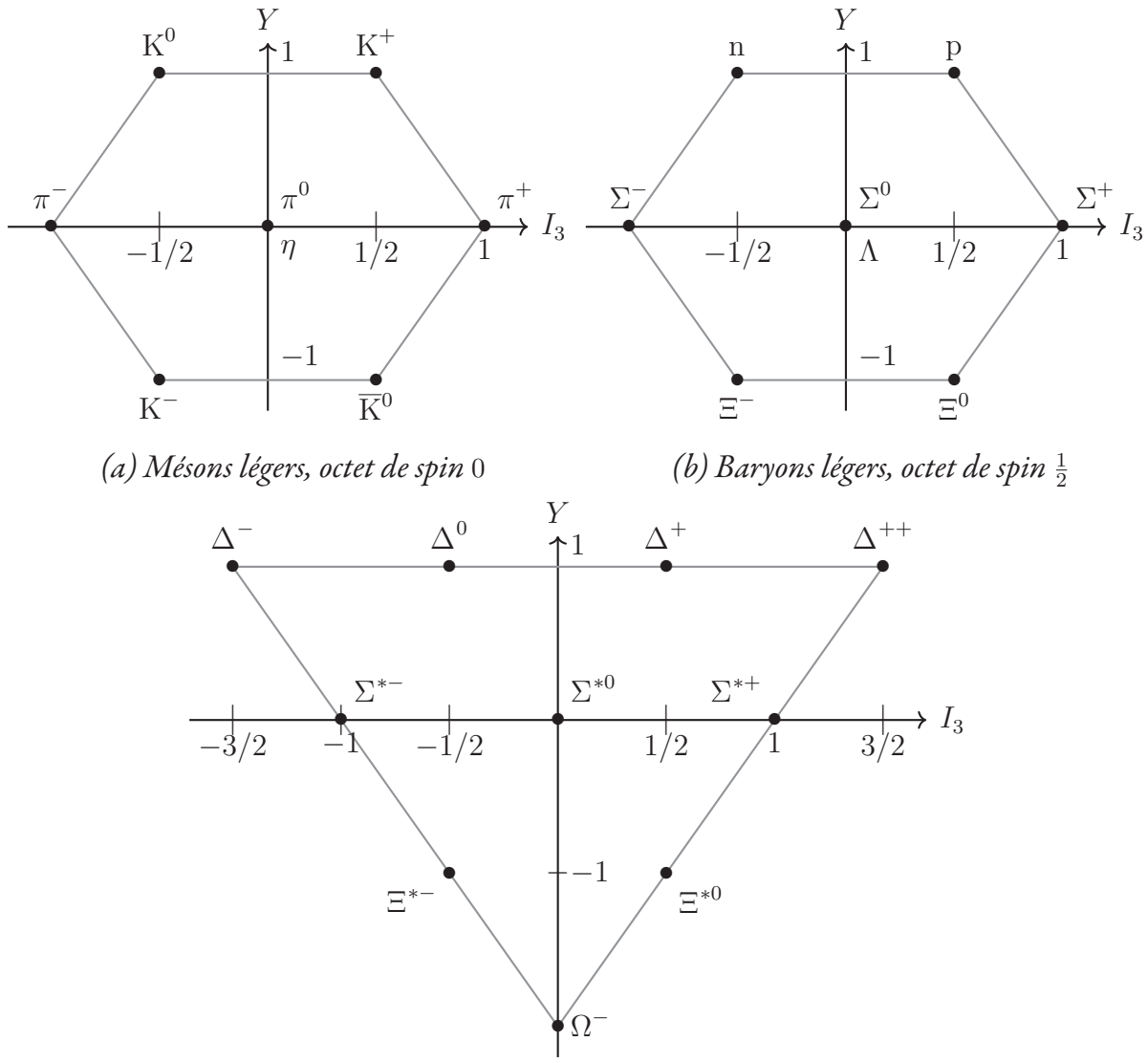
Afin de mettre de l'ordre parmi toutes ces nouvelles particules, la théorie des groupes de symétrie est l'outil mathématique privilégié par les physiciens. En 1961, Gell-Mann propose une classification basée sur le groupe de symétrie $\mathrm{SU}(3)$, donc plus large que celui de l'isospin, qu'il appelle la « voie octuple » (*Eightfold Way*), nom choisi en référence à la philosophie bouddhiste. Cette classification regroupe au sein d'une même famille les particules de même spin, mais d'isospin et d'étrangeté différents. Ces différentes familles correspondent aux représentations irréductibles possibles de $\mathrm{SU}(3)$. Ces familles contiennent un nombre déterminé de particules en fonction de la multiplicité de la représentation (1, 3, 6, 8, 10, 27). Par exemple, les baryons de spin $\frac{1}{2}$ sont un octet et les baryons de spin $\frac{3}{2}$ un décuplet. Le passage d'un membre à l'autre d'une même famille est réalisé par différentes opérations de symétrie. Pour l'illustrer, la figure 7.1 reproduit la classification proposée par Gell-Mann.

En utilisant le même groupe $\mathrm{SU}(3)$, Sakata propose en 1956 son propre modèle. À

5. Tadao Nakano et Kazuhiko Nishijima, «Letters to the Editor : Charge Independance for V-Particles», *PTP* 10, nº 5 (1953) : 581-582 ; Kazuhiko Nishijima, «Charge Independence Theory of V Particles», *PTP* 13, nº 3 (1955) : 285-304.

6. Murray Gell-Mann, «The interpretation of the new particles as displaced charge multiplets», *Nuovo Cimento* 4, nº 2 (1956) : 848-866.

7. Données reprises et adaptées de : Andrew Pickering, *Constructing Quarks : A Sociological History of Particle Physics* (Chicago, IL : University of Chicago Press, 1984), 58–59.



(a) Mésons légers, octet de spin 0

(b) Baryons légers, octet de spin $\frac{1}{2}$

(c) Baryons légers, décuplet de spin $\frac{3}{2}$

Fig. 7.1: Classification des particules selon la voie octuple (Eightfold Way) de Gell-Mann selon le groupe $\mathrm{SU}(3)$. *L'hypercharge* Y *est la somme du nombre baryonique et de l'étrangeté.*[7]

la différence de Gell-Mann, les baryons de spin $\frac{1}{2}$ sont regroupés dans un triplet (p, n, Λ), le « Sakaton », dont les trois particules constitutives sont considérées comme les constituants élémentaires de la matière et desquelles les autres particules sont composées. L'idée que certaines particules peuvent s'assembler pour en former d'autres, plus complexes, est n'est pas une idée nouvelle, mais elle s'affirme comme une évidence au fur et à mesure que le nombre de particules s'agrandit. Déjà en 1949, Enrico Fermi et Chen Ning Yang spéculent que les pions sont constitués d'une paire nucléon-antinucléon. On retrouve évidemment cette idée dans le modèle des quarks de Gell-Mann et George Zweig dont le modèle de Sakata peut légitimement être considéré comme un précurseur.[8] Suite à la conférence de Kiev de 1959, le modèle est amélioré par Maki, Nakagawa, Ohnuki et Sakata pour donner naissance au « modèle de Nagoya ».[9] Ceux-ci s'appuient sur la symétrie du courant faible remarquée par Gamba, Marshak et Okubo lorsque l'on substitue le triplet de Sakata par trois leptons :

$$\mathrm{p} \leftrightarrow \nu, \qquad \mathrm{n} \leftrightarrow \mathrm{e}^-, \qquad \Lambda \leftrightarrow \mu^-$$

Ils considèrent alors que les particules p, n et Λ sont constituées de leptons et d'une matière B^+ chargée positivement qu'ils écrivent symboliquement :

$$\mathrm{p} =< \mathrm{B}^+\nu >, \qquad \mathrm{n} =< \mathrm{B}^+\mathrm{e}^- >, \qquad \Lambda =< \mathrm{B}^+\mu^- >$$

Ces classifications ne sont cependant pas exemptes de difficultés. La symétrie $\mathrm{SU}(3)$ n'est pas parfaite et conduit à regrouper dans une même famille des particules de masses de proportions sensiblement différentes comme le kaon K^+, d'environ 495 MeV, et le pion π^+, de 140 MeV, qui font partie du même octet de spin 0 dans le modèle de Gell-Mann. Pour pallier la brisure de symétrie de $\mathrm{SU}(3)$, Gell-Mann (1961) et Susumu Okubo (1962) dérivent indépendamment une formule reliant la masse des hadrons d'un même multiplet en fonction de l'isospin et de l'étrangeté qui permet de prédire l'existence d'une particule Ω^- d'une masse de 1685 MeV, confirmée expérimentalement en février 1964 à l'Alternating Gradient Synchrotron de Brookhaven. Cette découverte appuie fortement la candidature du groupe $\mathrm{SU}(3)$ comme bon prétendant pour la classification des hadrons. Gell-Mann recevra en conséquence le prix

8. Pickering, *Constructing Quarks*, 85–89.
9. Yoshio Ohnuki, « Models for Elementary Particles and the Nagoya School 1955-1973 », *Progress of Theoretical Physics* 122, n° 1 (2009) : À propos du modèle de Sakata et de Nagoya, voir : Staley, *The Evidence for the Top Quark*, 15–19.

Nobel de physique en 1969.[10] Les travaux sur la classification de Gell-Mann aboutissent en 1964 au modèle des quarks, constituants élémentaires des hadrons, qui se maintiennent confinés par l'interaction forte. La théorie des quarks est la pierre angulaire du modèle standard de physique des particules encore en vigueur aujourd'hui.

En parallèle de la classification des particules, les physiciens cherchent à comprendre la dynamique des interactions nucléaires. Avec les succès éclatants de la QED pour expliquer l'interaction électron-positron, les théoriciens tentent naturellement d'exporter la recette de la TQC au noyau afin d'expliquer la radioactivité β (interaction faible) ainsi que l'interaction forte entre les nucléons constitutifs du noyau. Par analogie avec la QED qui attribue au photon le rôle du vecteur de l'interaction électromagnétique entre particules chargées, le boson W^- est désigné vecteur de l'interaction faible.[11] Comme elle est de courte portée (de l'ordre du rayon atomique), la masse de son boson vecteur doit, en accord avec les relations de Heisenberg, être très grande (*a contrario*, l'interaction électromagnétique de portée infinie est véhiculée par des photons de masse nulle). Cependant, les théoriciens butent sur la formulation d'une théorie des champs faibles renormalisable, condition nécessaire pour pouvoir utiliser les méthodes perturbatives à l'origine du succès de la QED. La solution est trouvée indépendamment dans le courant des années 1960 par Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg par l'unification des interactions faible et électromagnétique en une interaction unique électrofaible, qui est une théorie renormalisable. La théorie électrofaible leur vaut le prix Nobel de physique en 1979.

Concernant l'interaction forte, d'après le modèle proposé par Yukawa en 1935,[12] le boson vecteur de l'interaction forte entre les nucléons devrait posséder une masse d'environ 100 MeV.[13] Un bon candidat est alors le pion π^0 de 140 MeV observé dans les rayons cosmiques et les accélérateurs. La théorie du champ fort est en principe renormalisable, mais la méthode des perturbations se montre cependant inapplicable. Celle-ci présuppose en effet que la perturbation reste contrôlée, c'est-à-dire que la constante de couplage entre les particules doit être très inférieure à l'unité. En QED, c'est la constante de structure fine $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$ (avec e la charge élémentaire) qui joue le rôle de couplage entre les électrons et les photons. Pour l'interaction forte entre nucléons, la valeur de cette constante $\frac{g^2}{\hbar c}$ est estimée à 15 dans les années 1940 et Bethe lui

10. Le prix Nobel de 1969 est particulièrement discuté. Beaucoup de physiciens souhaitent que le pakistanais Abdus Salam soit nominé et font pression sur le comité et son président, Ivar Waller. En 1970, Yukawa partage également sa tristesse à Waller de la non-nomination de Sakata qui vient juste de décéder, en dépit de ses contributions majeures en physiques des hautes énergies depuis plus de vingt ans. Robert Marc Friedman, *The Politics of Excellence : Behind the Nobel Prize in Science* (New York City, NY : Times Books, 2001), 263–266.

11. La particule est découverte au Conseil européen pour la recherche nucléaire (CERN) en 1953

12. Hideki Yukawa, «On the Interaction of Elementary Particles. I», *Proc. Phys.-Math. Soc. Jap.* 17 (1935) : 48-57.

13. Dans la dénomination actuelle, il s'agit de la force nucléaire résiduelle, l'interaction forte étant celle liant les quarks entre eux au sein des nucléons.

attribue même une valeur de 40 en 1949. Les physiciens sont alors contraints de passer par des méthodes non perturbatives qui sont inopérantes.[14] Abraham Pais, acteur de l'époque, relate une ère de frustration dans laquelle sont plongés les théoriciens qui accumulent un retard certain sur la physique expérimentale.[15]

Face aux échecs de la TQC dans le domaine nucléaire, certains physiciens explorent des voies alternatives. La plus populaire dans les années 1960 demeure celle de la théorie des matrices de diffusion S (*Scattering-matrix theory*). Elle s'appuie sur un formalisme élaboré à fin des années 1930 et le début des années 1940 par Archibald Wheeler et Werner Heisenberg qui permet de décrire les amplitudes de probabilité de passage d'un état initial à un état final. Les premières pierres de la théorie sont posées par Geoffrey Chew et Gell-Mann dans le milieu des années 1950. Depuis Berkeley, Chew et son groupe présentent la théorie comme l'anti-TQC, qu'ils déclarent morte pour décrire l'interaction forte. Contrairement à l'approche « aristocratique » de la TQC dans laquelle à chaque particule est assigné un champ particulier, Chew, avec la *bootstrap philosophy*,[16] propose au contraire la « démocratie nucléaire », dans laquelle toutes les particules, des plus stables au plus instables, sont solutions des équations de la matrice S et sont à la fois des particules élémentaires et des composés. La principale difficulté est que comme il existe *a priori* une infinité de particules, la matrice S mène alors à une infinité d'équations couplées entre elles. Le postulat indémontrable de Chew est qu'une solution de ce système infini existe et qu'elle est unique. De cette solution découlent toutes les propriétés des hadrons gouvernés par l'interaction forte. Si la théorie en restait là, elle serait inutilisable. Chew montre qu'en pratique il est possible de tronquer cet infini et d'appliquer des méthodes perturbatives ce qui permet de prédire les propriétés de certaines particules, comme la masse du méson ρ qui demeure son principal accomplissement.

La « crise » de la physique ne trouve d'issue véritablement positive qu'avec l'établissement d'une théorie satisfaisante des quarks dans le milieu des années 1970, la chromodynamique quantique (QCD), qui attribue à chaque quark une charge de couleur dont le vecteur d'interaction est un boson appelé gluon. Le champ mésique de Yukawa n'est alors plus considéré fondamental, mais comme résultant d'une théorie effective de la QCD. Le problème de la grandeur de la constante de couplage g est résolu en 1974 avec la découverte de la liberté asymptotique en 1973–74 par David Politzer, David Gross et Frank Wilcek. Celle-ci prévoit que la constante de couplage décroit à haute énergie, permettant ainsi de recourir aux méthodes perturbatives.

14. Pais, *Inward Bound*, 481–485.
15. Ibid., 492–494.
16. Un *bootstrap* correspond littéralement la languette arrière présente sur certaines chaussures. L'adjectif se réfère à l'expression anglaise « to pull oneself up by one's bootstraps », « se tirer par les chaussures », dont l'origine proviendrait des aventures du Baron de Münchhausen qui, dans l'un des nombreux récits contant ses exploits, parvient à se sortir lui et son cheval de sables mouvants en se soulevant lui-même par les cheveux. Un phénomène bootstrap s'auto-initie sans intervention extérieure.

7.2 Le modèle unifié des particules du groupe IHP

7.2.1 Le modèle classique de la gouttelette Bohm-Vigier

Le modèle des particules élaboré à l'IHP prend place dans cette période d'incertitude. Le groupe va entrer dans la compétition théorique en proposant une solution basée sur les principes de l'ICMQ. Une exigence forte dictée par le critère de réalisme est que la particule doit posséder une extension spatiale. Il s'agit d'une critique récurrente de l'ICMQ contre l'ISMQ, déjà évoquée par Vigier dans sa thèse ainsi que par Bohm dans sa théorie du fluide de Pauli. La seconde exigence que s'imposent les physiciens est que la théorie doit dès le départ s'inscrire dans un cadre relativiste, ce qui fait sens pour le domaine des hautes énergies dans lequel la physique newtonienne n'est plus effective.

L'article fondateur du modèle est soumis par Bohm et Vigier en 1957 à *Physical Review*.[17] Comme évoqué en introduction de ce chapitre, le chemin général emprunté consiste à élaborer dans un premier temps une théorie de la particule classique que les physiciens vont ensuite quantifier. Cet édifice classique ne se construit pas sur un terrain totalement vierge puisque par le passé d'autres physiciens se sont penchés sur des modèles classiques des particules, en particulier de l'électron qui possède un mouvement de rotation sur lui même. Parmi ces modèles, Bohm et Vigier s'inspirent en particulier des théories relativistes de l'électron de Yakov Frenkel de 1926,[18] Myron Mathisson,[19] Jan Weyssenhoff,[20] Maurice Pryce,[21] et Christian Møller.[22]

Le premier obstacle qu'identifient Bohm et Vigier dans l'élaboration de leur modèle des particules étendu est que le concept de corps rigide, bien commode pour décrire la cinématique d'un solide en rotation, n'a pas de sens dans le cadre relativiste. En effet,

17. David Bohm et Jean-Pierre Vigier, « Relativistic Hyrodynamics of Rotating Fluid Masses », *Phys. Rev.* 109, n° 6 (1958) : 1882-1891.
18. Yakov Frenkel, « Die Elektrodynamik des rotierenden Elektron », *Zeitschrift für Physik* 37, n°s 4–5 (1926) : 243-262.
19. Myron Mathisson, « Das zitternde Elektron und seine Dynamik », *Acta Physica Polonica* 6 (1937) : 218-227.
20. Jan W. Weyssenhoff et Raabe Antoni, « Relativistic Dynamics of Spin Fluids and Spin Particles », *Acta Physica Polonica* 6 (1947) : 7-18.
21. Maurice H. L. Pryce, « The Mass-Centre in the Restricted Theory of Relativity and Its Connexion with the Quantum Theory of Elementary Particles », *Proc. R. Soc. A* 195, n° 1040 (1948) : 62-81.
22. Christian Møller, « Sur la dynamique des systèmes ayant un moment angulaire interne », *Ann. IHP* 11, n° 5 (1949) : 251-278 ; Concernant les travaux de Mathisson et Weyssenhoff en particulier, voir : Bronisław Średniawa, « Myron Mathisson's and Jan Weyssenhoff's Work on the Problem of Motion in General Relativity », in *Studies in the History of General Relativity*, sous la dir. de Jean Eisenstaedt et Anne J. Kox (Boston, MA : Birkhäuser, 1992), 400-406.

la dilatation du temps et la contraction des longueurs altèrent la forme du solide en mouvement. Bohm et Vigier partent alors d'une particule qui prend la forme d'une gouttelette liquide qui peut ainsi se déformer. La seconde difficulté, véritable talon d'Achille de tout modèle étendu, concerne la stabilité même de la particule. L'un des principaux arguments en défaveur de la théorie de Lorentz de l'électron étendu est qu'il nécessite une force cohésive sous peine de voir ses parties se repousser les unes des autres (voir la section 3.1.1 page 90). Bohm et Vigier évacuent temporairement cette difficulté en postulant d'emblée l'existence de telles forces de cohésions internes qui maintiennent la gouttelette, mais qui demeurent toutefois encore inconnues.

La gouttelette de Bohm et Vigier peut subir une grande variété de mouvements de différentes natures (translations, rotations, vibrations). En conséquence, les physiciens ne partent d'aucune équation du mouvement particulière et seules des hypothèses physiquement raisonnables valables sont émises, quelles que soient les équations. Ces hypothèses sont les conservations du tenseur énergie-impulsion $T^{\mu\nu}$[23] et du courant j_μ.

À partir du tenseur énergie-impulsion, les auteurs définissent le quadrimoment $G_\mu = \int T_{0\mu}\mathrm{d}V$ où $\mathrm{d}V$ est un élément de volume. La composante temporelle $G_0 = \int T_{00}\mathrm{d}V$ correspond à l'énergie totale. Le vecteur G_μ est supposé être constant au cours du temps, donc $\frac{\mathrm{d}G_\mu}{\mathrm{d}t} = 0$. Ils définissent à partir du moment un invariant $G^\mu G_\mu = -M_0^2c^2$, où M_0^2 est la masse propre totale, également appelée par de Broglie « masse propre d'impulsion » en raison de sa provenance. Comme nous le verrons par la suite, elle se distingue d'une autre masse, m_0, d'inertie.

La loi de conservation de l'énergie-impulsion est donnée par :

$$\partial_\nu T^{\mu\nu} = 0 \tag{7.2}$$

La conservation du quadrivecteur densité j_μ s'exprime pour sa part suivant :

$$\partial_\nu j^\mu = 0 \tag{7.3}$$

Dans ce dernier quadrivecteur, la composante temporelle « densité de matière » j_0 est proportionnelle à la quantité de matière d'une région donnée. Il peut s'agir, par exemple, de la quantité de particules. Les composantes spatiales j_i correspondent au débit surfacique de matière dans la direction de i.

Centre de masse et centre de matière

Le postulat fondamental qui distingue la théorie de Vigier et de Bohm de celles de Mathisson et de Weyssenhoff est qu'ils considèrent que les densités d'énergie T^{00} et de

23. Le tenseur $T^{\mu\nu}$ est une matrice 4×4 dans laquelle T^{00} est la densité d'énergie, les T^{i0} sont les composantes de la densité de moment, les T^{0i} sont les composantes du flux d'énergie, les éléments diagonaux T^{ii} correspond à la pression et les T^{ij} sont la viscosité du fluide.

matière j_0 n'ont aucune raison *a priori* d'être proportionnelles. Cette proportionnalité est valable à l'approximation newtonienne, mais ne doit pas être postulée dans le cas relativiste général.

Le raisonnement de Bohm et Vigier est qu'il faut alors distinguer la quantité de matière qui est invariante quel que soit le référentiel de la masse qui n'est quant à elle pas constante. Halbwachs illustre ce phénomène en considérant une quantité de matière distribuée sphériquement dans son référentiel propre et tournant sur elle-même. Cette quantité de matière est en plus animée par une vitesse de translation $\boldsymbol{v}$ par rapport au référentiel du laboratoire (voir la figure 7.2). Dans le référentiel du laboratoire, la sphère se transforme alors en ellipsoïde, mais conserve sa symétrie « nord-sud». Par contre, en raison du mouvement de rotation, la densité sera plus élevée dans l'hémisphère sud, ce qui se traduit par un déplacement du centre de gravité vers cet hémisphère.[24]

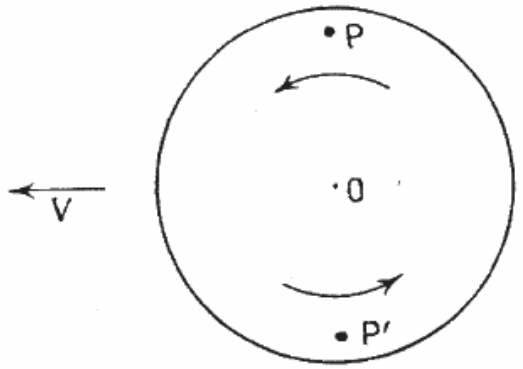


Fig. 7.2: Déplacement relativiste d'une particule dotée d'un mouvement de rotation interne.[25]

Pour cette raison, les auteurs distinguent deux points caractéristiques de la gouttelette : le centre de masse X_μ, ou centre de gravité,[26] qui est le barycentre relatif à la densité d'énergie T^{00}, et le centre de matière, barycentre relatif à la densité de matière j_0. Comme ces deux points varient d'un référentiel à l'autre en raison des transformations de Lorentz, Halbwachs les qualifie de « pseudo-centres». Il suggère alors de les considérer dans un référentiel particulier d'inertie, défini par l'hyperplan Π_1 et l'axe de temps Λ_1.[27] La raison est que dans ce référentiel, le moment G_μ est orthonormal à Π_1, ce

24. Halbwachs, « Recherches sur la mécanique du corpuscule tournant relativiste et l'hydrodynamique relativiste des fluides dotés d'une densité de moment angulaire interne», 72–73.
25. Francis Halbwachs, «Recherches sur la mécanique du corpuscule tournant relativiste et l'hydrodynamique relativiste des fluides dotés d'une densité de moment angulaire interne» (thèse de doct., Faculté des Sciences de Paris, 1958), 72.
26. Les deux points coïncident si le champ gravitationnel est uniforme.
27. Un hyperplan est la généralisation de la notion de plan par rapport à un espace vectoriel de dimension 3. Ici l'hyperplan Π est un sous espace de dimension 3 de l'espace-temps à 4 dimensions représenté par l'espace vectoriel $\Pi\Lambda$.

qui correspond effectivement à la définition d'un mouvement rectiligne uniforme.[28]

Dans ce référentiel où la gouttelette occupe un volume Σ_1, les cordonnées du centre de masse sont :

$$G_0 X_\mu = \int_{\Sigma_1} T_{00} x_\mu \mathrm{d}V \tag{7.4}$$

Par hypothèse, la vitesse d'espace du centre de masse est colinéaire au moment. Elle est donnée par $v_i = \frac{\mathrm{d}X_i}{\mathrm{d}t} = \frac{G_i}{G_0}$. La quadrivitesse relativiste est $v_\mu = \frac{G_\mu}{M_0 c}$.

Les coordonnées du centre de matière sont pour leur part :

$$J_0 Y_\mu = \int_{\Sigma_1} j_0 x_\mu \mathrm{d}V \tag{7.5}$$

Où $J_0 = \int_{\Sigma_1} j_0 \mathrm{d}V$ est la quantité totale de matière de la gouttelette. La vitesse d'espace du centre de matière est $u_i = \frac{J_i}{J_0}$ et sa quadrivitesse relativiste est sa dérivée par rapport à son temps propre $\mathrm{d}\tau$: $u_\mu = \dot{Y}_\mu = \frac{\mathrm{d}Y_\mu}{\mathrm{d}\tau}$.

Bohm et Vigier concluent de cette distinction entre le centre de masse et le centre de matière la validation de l'hypothèse d'une extension spatiale des particules. Dans ce modèle, la ponctualité, qui se traduit par la coïncidence des centres de masse et de matière, vaut en tant qu'approximation newtonienne. Cette propriété se révèle importante du point de vue de l'élaboration d'une théorie réaliste puisque la structure étendue émerge ici comme une conséquence mathématique des équations relativistes, alors qu'elle était introduite *a priori* jusque-là, comme dans la thèse de Vigier ou dans la théorie du fluide de Pauli de Bohm, Schiller et Tiomno.

Moment angulaire total et moment angulaire interne

Afin de décrire le mouvement de rotation de la particule sur elle-même, Bohm et Vigier introduisent le moment angulaire. Dans le cadre relativiste, la généralisation du moment par rapport à un quadrivecteur de composantes x_μ est le tenseur :

$$M_{\mu\nu} = \int_\Sigma \left(x_\mu T_{\nu 0} - x_\nu T_{\mu 0} \right) \mathrm{d}V \tag{7.6}$$

De Broglie leur fait alors remarquer que le moment ne possède de réelle signification que s'il est calculé relativement à un point appartenant à la particule, lui conférant ainsi une existence intrinsèque. Bohm et Vigier définissent alors un second moment angulaire, le « moment angulaire interne» $\mathcal{S}_{\mu\nu}$ dont ils choisissent comme point de référence le centre de matière Y_μ :

$$\mathcal{S}_{\mu\nu} = \int_\Sigma \left[(x_\mu - Y_\mu) T_{\nu 0} - (x_\nu - Y_\nu) T_{\mu 0} \right] \mathrm{d}V \tag{7.7}$$

28. Halbwachs, « Recherches sur la mécanique du corpuscule tournant relativiste et l'hydrodynamique relativiste des fluides dotés d'une densité de moment angulaire interne», 83–85.

Il vient des équations (7.6) et (7.7) :[29]

$$M_{\mu\nu} = \mathcal{S}_{\mu\nu} + Y_\mu G_\nu - Y_\nu G_\mu \tag{7.8}$$

Le moment angulaire total $M_{\mu\nu}$ est ainsi la somme d'une composante orbitale $Y_\mu G_\nu - Y_\nu G_\mu$ et d'une composante interne $\mathcal{S}_{\mu\nu}$. Le choix de Y_μ au lieu de X_μ comme point de référence dans le calcul du moment angulaire interne comporte une part d'arbitraire. Les auteurs justifient ce choix afin de différencier leur théorie de celle de Møller dans laquelle ce moment est calculé en fonction du centre de masse.[30] Lorsqu'il est calculé relativement à X_μ, le moment angulaire est constant dans le temps ($\frac{\mathrm{d}\mathcal{M}_{\mu\nu}}{\mathrm{d}\tau} = 0$). Par contre, en le considérant relativement à Y_μ, le moment angulaire interne varie avec le temps ($\frac{\mathrm{d}\mathcal{M}_{\mu\nu}}{\mathrm{d}\tau} \neq 0$) et la gouttelette adopte des mouvements plus complexes, fondamentalement différents des lois newtoniennes. Ceci constitue une raison suffisante pour Bohm et Vigier d'adopter Y_μ comme point de référence et ils espèrent de la sorte déduire de nouvelles propriétés physiques de la gouttelette. Dans cette perspective, le centre de matière Y_μ devient le centre de référence pour l'étude de la trajectoire de la gouttelette tandis que le centre de masse X_μ est un point mobile à l'intérieur de celle-ci.

Dans une version plus élaborée de la théorie, le moment angulaire total est calculé en fonction des seuls centres X_μ et Y_μ (avec $R_\mu = X_\mu - Y_\mu$) :[31]

$$\mathcal{M}_{\mu\nu} = \mathcal{S}_{\mu\nu} + R_\mu G_\nu - R_\nu G_\mu \tag{7.9}$$

Dans ce moment cinétique, la partie orbitale est calculée relativement au centre de masse X_μ et non à une origine quelconque. De cette sorte, $\mathcal{M}$ est complètement décrit en fonction de points ayant une signification physique réelle, comme le préconise de Broglie.

Vecteurs balourd et giration

Dans sa thèse de doctorat, Halbwachs démontre que dans un hyperplan Π, les composantes temporelles du moment angulaire interne :[32]

$$\mathcal{S}_{i0} = \int_\Sigma [(x_i - Y_i)T_{00} - (x_0 - Y_0)T_{i0}]\,\mathrm{d}V \tag{7.10}$$

sont celles d'un vecteur colinéaire joignant le centre de matière au centre de masse.

29. Les notations varient d'une publication à une autre. Dans l'article de Bohm et Vigier, le moment angulaire total est noté L et le moment interne $\mathcal{M}$. Nous reprenons ici les notations de Halbwachs.
30. Møller, « Sur la dynamique des systèmes ayant un moment angulaire interne », 257–258.
31. Francis Halbwachs et Jean-Pierre Vigier, «Lie Relations Associated with Relativistic Rotators and Bilocal Theory», *Nuovo Cimento* XVI, n° 3 (1960).
32. Halbwachs, « Recherches sur la mécanique du corpuscule tournant relativiste et l'hydrodynamique relativiste des fluides dotés d'une densité de moment angulaire interne », 80–83.

Halbwachs en déduit une relation importante pour le modèle qui exprime le moment angulaire interne comme une fonction linéaire de la distance entre les coordonnées des centres de matière et de gravité :

$$\mathcal{S}_{\mu\nu}u_\nu = G_\nu u_\nu R_\mu \tag{7.11}$$

Dans cette dernière relation, une nouvelle masse m_0 apparait, différente de la masse propre d'impulsion M_0 et définie telle que $G_\nu u_\nu = -m_0^2c^2$. Elle est appelée par de Broglie la « masse propre d'inertie». À partir de la relation 7.11, Halbwachs introduit deux vecteurs, le « balourd» t_μ et la « giration» s_μ :[33]

$$\begin{cases} t_\mu = \mathcal{S}_{\mu\nu}u^\nu = m_0cR_\mu \\ s_\mu = \mathcal{S}^\star_{\mu\nu}u^\nu = \frac{1}{2}\epsilon_{\mu\nu\alpha\beta}u^\nu\mathcal{S}^{\alpha\beta} \end{cases} \tag{7.12}$$

Les termes « giration» et « balourd» s'inspirent de la mécanique classique. Le balourd correspond en effet à une distribution volumique non uniforme de la masse. Elle entraine une différentiation de l'axe d'inertie et de l'axe de rotation et donc un déséquilibre du solide. Dans le cas de la gouttelette relativiste de Bohm et de Vigier, un phénomène similaire se produit puisque le centre de matière ne coïncide plus avec le centre de masse. C'est exactement ce qu'exprime ce vecteur qui relie les centres de masse et de matière entre eux par la relation $t_\mu = m_0cR_\mu$. Le schéma 7.3 de de Broglie représente les deux vecteurs $\boldsymbol{t}$ et $\boldsymbol{s}$ dans le référentiel Π_0 attaché à Y_0 (dans ce repère, les composantes temporelles t_0 et s_0 sont nulles).

Avec Vigier et Bohm, Halbwachs montre que le tenseur $\mathcal{S}_{\mu\nu}$ peut se reformuler en fonction uniquement de ces deux vecteurs :

$$\mathcal{S}_{\mu\nu} = t_\mu u_\nu - t_\nu u_\nu + \frac{1}{2}\epsilon_{\mu\nu\alpha\beta}\left(s^\alpha u^\beta - s^\beta u^\alpha\right) \tag{7.13}$$

Le mouvement de rotation interne de la gouttelette peut ainsi s'assimiler à un double mouvement de rotations de X autour de Y suivant les deux axes t_μ et s_μ. Les auteurs interprètent ce mouvement comme l'équivalent classique du *Zitterbewegung* (tremblement) que subit l'électron dans l'équation de Dirac découvert par Schrödinger en 1930.

Lorsque les centres de masse et de matière coïncident, le balourd $t_\mu = \mathcal{S}_{\mu\nu}u^\mu = 0$ et seule demeure la giration. Elle se confond alors avec le mouvement de rotation interne, le spin. Dans ce cas, la théorie coïncide avec celle de Weyssenhoff qui admet

33. Le tenseur $\mathcal{S}^\star_{\mu\nu}$ est appelé le tenseur dual de $\mathcal{S}_{\mu\nu}$ et $\epsilon_{\mu\nu\alpha\beta}$ le tenseur complètement antisymétrique de Levi-Civita.

34. Louis de Broglie, *Introduction à la nouvelle théorie des particules de M. Jean-Pierre Vigier et de ses collaborateurs* (Paris : Gauthier-Villars, 1961), 65.

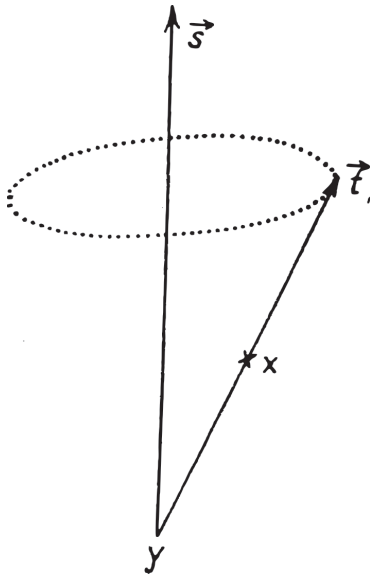


Fig. 7.3: Vecteurs giration **s** *et balourd* **t** *dans le référentiel* Π_0 *attaché au centre de matière. Schéma de de Broglie.*[34]

pour sa part la condition $\mathcal{S}_{\mu\nu}u^{\mu} = 0$ comme postulat. Dans le modèle de la gouttelette de Bohm-Vigier, le spin σ_{μ} est généralement un vecteur indépendant de t_{μ} et de s_{μ}.

La théorie bilocale et le rotateur relativiste

La cinématique de la particule consiste alors en la description du mouvement relatif des deux points caractéristiques, le centre de masse X_{μ} et le centre de matière Y_{μ}. Cette dualité est qualifiée de « bilocalilté »,[35] terme emprunté à Yukawa qui l'introduit dès 1950 dans sa théorie des champs non locaux.[36]

Il est ainsi possible d'attacher à chacun des points X_{μ} et Y_{μ} un référentiel. Les physiciens appellent ce référentiel un « tétrapode », qui est la traduction malencontreuse de l'allemand « vierbein » (en anglais « tetrad »).[37] Un tétrapode définit un repère mobile par un ensemble de quatre vecteurs a^{ξ}_{μ} unitaires et orthogonaux entre eux étiquetés $\xi = 1, 2, 3, 4$. L'ensemble de cet édifice mathématique est appelé un « rotateur relativiste », terme cette fois-ci emprunté au japonais Tadao Nakano.[38]

35. David Bohm et al., «Relativistic Rotators and Bilocal Theory», *PTP* 23, n° 3 (1960) : 496-511.
36. Hideki Yukawa, «Quantum Theory of Non-Local Fields I. Free Fields», *Phys. Rev.* 77, n° 2 (1950) : 219-226.
37. Dans la littérature standard, le terme féminin « tétrade » est habituellement employé. En relativité, le formalisme de la tétrade sert notamment à décrire les mouvements des repères mobiles ainsi que les objets en rotation.
38. Nakano, « A Relativistic Field Theory of an Extended Particle, I » ; À noter que ce n'est pas le premier emploi des rotateurs dans l'ICMQ pour décrire les mouvements de rotation puisque Vigier et Takabayasi les introduisent dès leur étude de la théorie de Pauli comme représentation alternative, mais équivalente, à l'hydrodynamique, dans un formalisme qui s'appuie sur les travaux de Nakano. Takabayasi et Vigier, « Description of Pauli Matter as a Continuous Assembly of Small Rotating Bodies », 583–585 ; Nakano, « A Relativistic Field Theory of an Extended Particle, I ».

Halbwachs, Hillion et Vigier comparent le modèle bilocal à la représentation planétaire de l'atome d'hydrogène dans laquelle un électron tourne autour d'un proton, mais qui possède en plus un mouvement de rotation sur lui même (spin). Cette analogie permet d'envisager la signification d'une quantification du modèle. Les états stables de la particule correspondent à un retour à l'orientation initiale de a_μ^ξ par rapport à b_μ^ξ, qui se réalise après un nombre déterminé de révolutions de X_μ autour de Y_μ (ou l'inverse).[39]

La dynamique de la particule

Afin de décrire les mouvements relatifs des deux centres, il parait assez naturel pour les physiciens de passer par le formalisme des angles d'Euler. Cependant, la particule évoluant dans l'espace de Minkowski à quatre dimensions, il faut alors passer par une généralisation de ces angles adaptés à cet espace. Halbwachs, assisté de Vigier et de Hillion, discute à l'occasion du séminaire de Louis de Broglie de la théorie relativiste des angles d'Euler qu'ils adaptent au formalisme des rotateurs.[40] Ces angles sont les quantités complexes $\omega^+ = (\theta^+, \varphi^+, \psi^+)$ et $\omega^- = (\theta^-, \varphi^-, \psi^-)$ avec :

$$\begin{cases} \varphi^\pm = \varphi_1 \pm i\varphi_2 \\ \theta^\pm = \theta_1 \pm i\theta_2 \\ \psi^\pm = \psi_1 \pm i\psi_2 \end{cases} \tag{7.14}$$

Les angles réels φ_1, θ_1 et ψ_1 correspondent aux angles d'Euler habituels (voir la section 6.1.1 page 181) tandis que $i\varphi_2$, $i\theta_2$ et $i\psi_2$ sont des angles hyperboliques qui varient de $-\infty$ à $+\infty$. En outre, les auteurs montrent que les tétrapodes a_μ^ξ et b_μ^ξ sont respectivement équivalents aux deux espaces tridimensionnels complexes $A_k^{r\pm}$ et $B_k^{r\pm}$ qui peuvent être repérés l'un par rapport à l'autre par les angles complexes $\omega^\pm$. L'avantage d'une telle représentation est qu'elle permet un traitement analogue au cas galiléen dans lequel les réels sont remplacés par des complexes.

Dans ce système de coordonnées, il est possible de définir des moments canoni-

39. Francis Halbwachs, Pierre Hillion et Jean-Pierre Vigier, «Internal Motions ol Relativistic Fluid Masses», *Nuovo Cimento* XV, n° 2 (1960) : 216–217 ; La cinématique des rotateurs est décrite à de multiples occasions, voir entre autres : Francis Halbwachs, Jean-Marie Souriau et Jean-Pierre Vigier, «Le groupe d'invariance associé aux rotateurs relativistes et la théorie bilocale», *JPR* 22, n° 7 (1961) : 393-406 ; Maurice Kleman, «Mouvements internes d'une particule relativiste», *JPR* 22, n° 7 (1961) : 435-442.

40. Francis Halbwachs, «Rotation instantanée et angle d'Euler dans l'espace-temps», *Ann. IHP* 16, n° 3 (1959) : 145-160 ; Francis Halbwachs, Pierre Hillion et Jean-Pierre Vigier, «Théorie mathématique des angles d'Euler dans l'espace-temps», *Ann. IHP* 16, n° 3 (1959) : 115-143.

quement conjugués aux angles d'Euler en fonction d'un lagrangien L :

$$\begin{cases} p_{\varphi^\pm} = \frac{\partial L^\pm}{\partial \dot{\varphi}} \\ p_{\theta^\pm} = \frac{\partial L^\pm}{\partial \dot{\theta}} \\ p_{\psi^\pm} = \frac{\partial L^\pm}{\partial \dot{\psi}} \end{cases} \tag{7.15}$$

Bohm, Hillion et Takabayasi montrent que le hamiltonien du rotateur relativiste, qui découle du lagrangien par la relation $H = p_i \dot{q}_i - L$, est :[41]

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{2I}\left[{p_{\theta^+}}^2 + \frac{1}{\sin^2\theta^+}\left({p_{\psi^+}}^2 + {p_{\varphi^+}}^2 - 2p_{\psi^+}p_{\varphi^+}\cos\theta^+\right)\right] \\ &\quad + \frac{1}{2I}\left[{p_{\theta^-}}^2 + \frac{1}{\sin^2\theta^-}\left({p_{\psi^-}}^2 + {p_{\varphi^-}}^2 - 2p_{\psi^-}p_{\varphi^-}\cos\theta^-\right)\right] \\ &= \frac{1}{2I}\left(p_k^+ p_k^+ + p_k^- p_k^-\right) = \frac{1}{2I}\left(p'^+_k p'^+_k + p'^-_k p'^-_k\right) \\ &= H^+ + H^- \end{aligned} \tag{7.16}$$

Le moment d'inertie I est défini en fonction du moment angulaire interne $S_{\mu\nu}$ par $\mathcal{S}_{\mu\nu}u_\nu = I\dot{u}_\mu$. Les moments cinétiques p_k (respectivement p'_k) correspondent aux projections du moment angulaire interne sur le repère complexe $A^\pm$ (respectivement $B^\pm$). La forme de cet hamiltonien dans l'espace tridimensionnel complexe est intéressante si on la compare à l'hamiltonien du système équivalent non relativiste d'une particule à symétrie sphérique :

$$H = \frac{1}{2I}\left[p_\theta^2 + \frac{1}{\sin^2\theta}\left({p_\psi}^2 + {p_\varphi}^2 - 2p_\psi p_\varphi \cos\theta\right)\right] \tag{7.17}$$

Le passage à la relativité s'effectue alors simplement par substitution des grandeurs réelles par celles complexes. Il s'agit d'une sorte de principe de correspondance comme il en existe un pour passer de la mécanique classique à quantique.[42]

Les travaux présentés ci-dessus constituent la théorie classique de la particule étendue, ou gouttelette de Bohm-Vigier.

7.2.2 La quantification de la théorie

Une fois la théorie classique de la particule établie, les physiciens décident de la quantifier en utilisant la procédure standard.[43] Cette quantification s'appuie large-

41. Les expressions algébriques des p_k et p'_k sont précisées dans l'annexe C.3 Bohm et al., « Relativistic Rotators and Bilocal Theory », 509–510.
42. Pierre Hillion et Jean-Pierre Vigier, « Les ondes associées à une structure interne des particules », *Ann. IHP* 17, n° 3 (1962) : 152.
43. David Bohm, Pierre Hillion et Jean-Pierre Vigier, « Internal Quantum States of Hyperspherical (Nakano) Relativistic Rotators », *PTP* 24, n° 4 (1960) : 761-782.

ment sur la thèse de doctorat de la physicienne néerlandaise Clasine van Winter soutenue en 1957 à l'université de Groningue.[44] Les recherches de Van Winter qui portent sur la description du spin isobarique dans l'espace de Minkowski partagent de nombreux points communs avec celles poursuivies par le groupe IHP. Van Winter a d'ailleurs déjà bien balisé le terrain en ayant notamment calculé les fonctions et valeurs propres des moments cinétiques quantifiés.

La quantification de la gouttelette est réalisée tout simplement en substituant les moments conjugués par des opérateurs quantiques :

$$\begin{cases} p_{\varphi^\pm} \to -i\hbar\frac{\partial}{\partial\varphi^\pm} \\ p_{\theta^\pm} \to -i\hbar\frac{\partial}{\partial\theta^\pm} \\ p_{\psi^\pm} \to -i\hbar\frac{\partial}{\partial\psi^\pm} \end{cases} \tag{7.18}$$

Cette quantification est intrigante du point de vue de l'ICMQ. En effet, elle ne possède pas de réelle justification physique puisque l'algèbre des opérateurs n'a pas de sens dans une description qui prétend conserver un esprit classique. Nous reviendrons en fin de chapitre sur cet aspect singulier au regard de l'approche générale de l'ICMQ qui prévalait jusque-là.

En conséquence, les projections du moment angulaire p_k et p'_k deviennent à leur tour des opérateurs $\mathrm{J_i}$ et $\mathrm{J'_i}$ qui satisfont aux règles de commutation :

$$\left[\mathrm{J_i^\pm}, \mathrm{J_j^\pm}\right] = -i\hbar\mathrm{J_k^\pm} \qquad \left[\mathrm{J'^\pm_i}, \mathrm{J'^\pm_j}\right] = -i\hbar\mathrm{J'}_k^\pm \tag{7.19}$$

$$\left[\mathrm{J_k^+}, \mathrm{J_j^-}\right] = \left[\mathrm{J_k^+}, \mathrm{J'^-_j}\right] = \left[\mathrm{J'^+_k}, \mathrm{J'^-_j}\right] = 0 \tag{7.20}$$

Van Winter montre que l'ensemble complet d'observables qui commutent, c'est-à-dire qui détermine univoquement l'état du système, correspond aux opérateurs $(\mathrm{J}^\pm)^2$, $\mathrm{J_3^\pm}$, $\mathrm{S'}_3 = \mathrm{J'^+_3} + \mathrm{J'^-_3}$ et $(\mathrm{S'})^2$.[45]

Ces opérateurs satisfont aux relations :

$$\begin{cases} \mathrm{J_3^+}Z = m^+\hbar Z \qquad \mathrm{J_3^-}Z = m^-\hbar Z; \\ (\mathrm{J}^+)^2 Z = l^+(l^+ + 1)Z, \quad (\mathrm{J}^-)^2 Z = l^-(l^- + 1)Z; \\ \mathrm{S'}_3 Z = m'\hbar Z, \qquad (\mathrm{S'})^2 Z = s'(s' + 1)\hbar Z \end{cases} \tag{7.21}$$

Où l'harmonique sphérique $Z^{m^+,m^-,m'}_{l^+,l^-,s'}(\omega^+, \omega^-)$ est la fonction propre associée aux

44. Clasine van Winter, «Space-time rotations and isobaric spin» (thèse de doct., Université de Groningue, 1957).

45. Avec $(\mathrm{J}^\pm)^2 = (\mathrm{J_1^\pm})^2 + (\mathrm{J_2}^\pm)^2 + (\mathrm{J_3}^\pm)^2$ et $(\mathrm{S'})^2 = (\mathrm{S'}_1)^2 + (\mathrm{S'}_2)^2 + (\mathrm{S'}_3)^2$. L'opérateur S'_k est introduit par van Winter afin de garantir l'invariance par réflexion, ce qui réduit les nombres quantiques de quatre à trois par $m' = m'^+ + m'^-$.

six nombres quantiques $m^+, m^-, m', l^+, l^-, s'$. Ces nombres quantiques peuvent uniquement prendre les valeurs autorisées par les règles de sélections suivantes :

$$\begin{cases} l^{\pm} = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, ... \\ m^{\pm} = -l^{\pm}, -l^{\pm}+1, ..., l^{\pm}-1, l^{\pm} \\ s' = l^+ + l^-, l^+ + l^- - 1, ..., \left|l^+ - l^-\right| \\ m' = -s', -s'+1, ..., s'-1, s' \end{cases} \tag{7.22}$$

L'idée directrice de la thèse de van Winter est d'interpréter le spin isotopique comme un degré de liberté associé à une rotation interne de la particule. Il s'agit de prendre au pied de la lettre l'analogie entre le spin et l'isospin, alors que l'isospin n'est au départ qu'une méthode mathématique permettant de traiter les protons et les neutrons comme des nucléons d'isospins opposés grâce à $\mathrm{SU}(2)$. Van Winter émet alors l'hypothèse que l'opérateur ${S'}_i = {S_i}^+ + {S_i}^-$ pourrait être associé à l'isospin. Une conséquence directe de cette hypothèse est qu'en admettant que les mouvements de rotations soient généraux, c'est-à-dire valables pour toutes les particules, alors il faut également attribuer un isospin aux leptons, particules de spin $\frac{1}{2}$ (les électrons, les neutrinos et les muons), qui ne sont pourtant pas soumis à l'interaction forte. Van Winter reste toutefois prudente en l'absence d'une preuve expérimentale validant cette hypothèse. En conséquence, elle laisse provisoirement les leptons de côté et restreint son modèle aux seuls baryons.

L'hypothèse de van Winter séduit le groupe IHP qui n'a pas la même retenue en matière de spéculation théorique. Le groupe va la reprendre à son compte et l'approfondir. L'idée générale est d'attribuer à chaque état différent de la fonction d'onde Z une particule. Bohm, Hillion et Vigier retiennent en particulier trois opérateurs :

$$\begin{cases} (\mathrm{I}_3)_{op} Z = -i\left(\frac{\partial}{\partial\varphi^+} + \frac{\partial}{\partial\varphi^-}\right) Z = (m^+ + m^-)Z \\ \frac{1}{2}(n)_{op} Z = -i\frac{\partial}{\partial\psi_1} Z = m' Z \\ (\mathrm{Q})_{op} Z = (\mathrm{I_z})_{op} + \frac{1}{2}(n)_{op} = -i\left(\frac{\partial}{\partial\varphi_1} + \frac{\partial}{\partial\psi_1}\right) = (m^+ + m^- + m')Z \end{cases} \tag{7.23}$$

En associant les opérateurs $(\mathrm{I}_3)_{op}$, $\frac{1}{2}(n)_{op}$ et $(\mathrm{Q})_{op}$ respectivement à l'isospin total I_3, la moitié du nombre baryonique $\frac{B}{2}$ et à la charge électrique Q, la théorie recouvre parfaitement la formule de Gell-Mann-Nishijima avec comme loi de conservation :

$$Q = m^+ + m^- + m' \tag{7.24}$$

Ils attribuent ensuite aux deux composantes de l'isospin total l'isospin partiel i_3 et

la moitié de l'étrangeté $S/2$, dont les valeurs propres sont respectivement m^+ et m^- :

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}B = i_3 + \frac{1}{2}S + \frac{1}{2}B \tag{7.25}$$

Si les deux formules sont formellement identiques, elles ne le sont pas sur le plan de la physique. En effet, l'hypercharge $Y = B + S$, liée à l'interaction forte de la formule originale, ne possède ici aucune signification physique. La formule du groupe IHP introduit par contre l'isospin total I_3 qui se conserve, quelles que soient les interactions. Par contre, ses composantes i_3 et $S/2$ ne sont conservées que par l'interaction forte, mais pas par l'interaction faible. Afin de différencier l'isospin du spin ordinaire, de Broglie introduit la notion de spin interne et de spin externe. Dans cette distinction, l'isospin total I est un spin interne dont la composante I_z est prise selon un axe lié au référentiel d'inertie de la particule. Pour cette raison, sa valeur est fixe pour une particule donnée ($\frac{1}{2}$ pour le proton p, $-\frac{1}{2}$ pour le neutron n), au contraire du spin ordinaire dont la projection sur un axe z peut donner deux valeurs différentes, positive et négative. Le spin ordinaire est alors qualifié d'externe par de Broglie car il dépend de la mesure effectuée par un observateur, l'axe z est ici lié au laboratoire.[46]

7.2.3 La première classification des particules

À partir de l'équation (7.25), le groupe IHP propose de classer les particules en fonction des trois nombres quantiques (m^+, m^-, m'). Le passage des particules aux antiparticules s'effectue par inversion de tous les signes des trois nombres quantiques. Par exemple, l'électron e^- est défini par $m^+ = -\frac{1}{2}$, $m^- = -\frac{1}{2}$ et $m^- = 0$, tandis que le positron e^+ par $m^+ = \frac{1}{2}$, $m^- = \frac{1}{2}$ et $m^- = 0$. En suivant cette règle, ils obtiennent le tableau 7.1 (nous n'avons pas reporté les antiparticules).

Quelques « bizarreries» apparaissent dans cette classification. Certains leptons se voient en effet dotés à la fois d'un isospin i_3 et d'une étrangeté S. Par exemple, le muon μ^- possède une étrangeté de $-\frac{1}{2}$ alors qu'il n'est pas soumis à l'interaction forte. Certaines particules peuvent également posséder des valeurs de nombres quantiques identiques, par exemple l'antiélectron e^+, ou positron, et le proton p ($m^+ = \frac{1}{2}$, $m^- = 0$ et $m' = \frac{1}{2}$). Ces particules ne sont en réalité pas identiques du point de vue théorique puisque ce n'est pas le même 0 associé a m^- dans l'un et l'autre des cas. Ceci est indiqué par la notation $\underline{0}$. Pour le proton, la valeur $\underline{0}$ provient d'une combinaison de l^+ et l^-, alors qu'il s'agit d'un vrai 0, c'est-à-dire une absence totale de « charge» baryonique, pour le positron. Ces propriétés spécifiques au modèle du rotateur le font nettement diverger de celui de la voie octuple de Gell-Mann et Ne'eman. Dès lors, il apparait dif-

46. Louis de Broglie, *Introduction à la nouvelle théorie des particules de M. Jean-Pierre Vigier et de ses collaborateurs* (Paris : Gauthier-Villars, 1961), 81–82.

Famille	Particule	$\frac{1}{2}B = m'$	$i_3 = m^+$	$\frac{1}{2}S = m^-$	$Q = m^+ + m^- + m'$
Leptons	e^-	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	-1
	ν_e	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
	μ^-	$-\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	-1
	ν_μ	$-\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	0
Baryons	p	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\underline{0}$	1
	n	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\underline{0}$	0
	Λ	$\frac{1}{2}$	$\underline{0}$	$-\frac{1}{2}$	$\underline{0}$
	Ξ^0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-1	$\underline{0}$
	Ξ^-	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	-1
	Σ^+	$\frac{1}{2}$	1	$-\frac{1}{2}$	1
	Σ^0	$\frac{1}{2}$	$\underline{0}$	$-\frac{1}{2}$	$\underline{0}$
	Σ^-	$\frac{1}{2}$	-1	$-\frac{1}{2}$	-1
Mésons	π^+	$\underline{0}$	1	0	1
	π^0	$\underline{0}$	$\underline{0}$	0	0
	π^-	$\underline{0}$	-1	0	-1
	K^+	$\underline{0}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	K^0	$\underline{0}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	K^-	$\underline{0}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1

Tab. 7.1: Première classification des particules du modèle Bohm-Vigier

ficilement envisageable que la confirmation de l'un puisse se faire tout en maintenant l'autre.

7.2.4 La poursuite du programme au Japon et la nouvelle classification des particules

Le programme de recherche en physique des particules se poursuit par un séjour de Vigier dans l'équipe de Yukawa à l'université de Kyoto en 1961 et 1962. Les circonstances exactes de cette collaboration ne sont pas claires. Pour la période, nous disposons pour seules archives de seulement deux lettres de Vigier à Bohm .[47] En tout état de cause, l'intégration de la bilocalité et du formalisme des rotateurs dénote déjà de l'ouverture de l'ICMQ sur la physique japonaise dont Takabayasi est *a priori* l'ins-

47. Jean-Pierre Vigier, Jean-Pierre Vigier à David Bohm, 17 mai 1962, The David Bohm Papers. Section C - Correspondence - Vigier J.-P. - C.61, Birkbeck Library, University of London, Londres ; Jean-Pierre Vigier, Jean-Pierre Vigier à David Bohm, 1962, The David Bohm Papers. Section C - Correspondence - Vigier J.-P. - C.61, Birkbeck Library, University of London, Londres.

tigateur. De retour à Nagoya après son séjour à Paris, celui-ci participe à l'important séminaire de physique des particules de l'Institut de recherche de physique fondamentale, adossé à l'université de Tokyo et dirigé par Yukawa. Le groupe de Yukawa constitue le fleuron de la physique japonaise,[48] et Takabayasi saisit l'occasion de ce séminaire pour y promouvoir les recherches poursuivies à l'IHP.[49] La décision favorable de Yukawa d'accueillir Vigier dans son équipe est peut-être en partie guidée par la volonté de tisser plus de liens avec l'Europe et les États-Unis et de rompre avec l'isolement de la physique japonaise. En effet, le sentiment partagé par de nombreux physiciens japonais de l'époque est de travailler en autarcie, sans que leurs travaux ne soient lus par les Européens et les Américains, en dépit de leurs qualités intrinsèques.[50]

Cette excursion de Vigier au Japon ne se concrétise cependant pas par l'établissement de liens durables entre les deux équipes. Les seules publications recensées sur la période sont deux courtes lettres aux éditeurs de *PTP* cosignées par Vigier, Yukawa et son étudiant Yasuhisa Katayama.[51] Toutefois, il est indéniable que Yukawa porte un certain intérêt pour le modèle du rotateur. Il va formuler un certain nombre d'hypothèses qui vont être prises au sérieux et directement intégrées à la théorie. Toutefois, ceci s'avère insuffisant pour qualifier ces échanges de véritable collaboration approfondie.

La nouvelle classification des particules à partir de la théorie des groupes

La première avancée pour la théorie est indéniablement une introduction plus explicite de la théorie des groupes de rotation.[52] Les groupes sont en effet un outil mathématique puissant qui permettent, d'une part, de classer les différentes particules afin de mettre de l'ordre dans ce zoo, mais, d'autre part, ils offrent surtout la possibilité de traiter avec aisance la notion de particule fondamentale et de particule composée. Cette distinction est primordiale afin de hiérarchiser les particules, mais aussi de faire des prédictions. Cependant, à l'instar de la quantification canonique, la nature abstraite des groupes est en porte-à-faux avec l'esprit initial de l'ICMQ, qui privilégie les représentations intuitives.

48. Low, *Science and the building of a New Japan*, 115.
49. Ezawa, « Takehiko Takabayashi (1919–1999)», 295–296.
50. Staley, *The Evidence for the Top Quark*, 39–44.
51. Yasuhisa Katayama, Jean-Pierre Vigier et Hideki Yukawa, «Letters to the Editor : An Approach to the Unified Theory of Elementary Particles», *PTP* 29, nº 3 (1963) : 468-470 ; Yasuhisa Katayama, Jean-Pierre Vigier et Hideki Yukawa, «Letters to the Editor : A theory of weak interaction based on a rotator model», *PTP* 29, nº 3 (1963) : 470-472.
52. Louis de Broglie et al., «Rotator Model of Elementary Particles Considered as Relativistic Extended Structures in Minkowski Space», *Phys. Rev.* 129, nº 1 (1963) : 438-450 ; Francis Halbwachs, «A New Classification of Elementary Particles and Resonances», *Nuovo Cimento* XXVIII, nº 4 (1963) : 695-705.

En partant du principe qu'à chaque vecteur propre représenté par un ket $\left|l^+l^-s';m^+m^-m'\right\rangle$ correspond une particule différente, les physiciens introduisent le groupe de rotation $G = \mathrm{SO3}^+ \times \mathrm{SO3}^- \times \mathrm{SO3}'$ qui associe à chaque nombre quantique (m^+, m^-, m') une rotation dans l'espace tridimensionnel complexe. Les différentes familles de particules correspondent alors aux représentations irréductibles $D(l^+l^-)$ du sous-groupe $\mathrm{SO3}^+ \times \mathrm{SO3}^-$ de G.[53] Concrètement, la famille des baryons regroupe les particules pour lesquels les nombres quantiques l^+ et l^- sont les plus faibles, c'est-à-dire $D(\frac{1}{2}0)$ et $D(0\frac{1}{2})$. Il s'agit des particules de plus basses énergies. Les différents membres de la famille sont obtenus en faisant varier les nombres m^+, m^- et m' selon les règles de sélection définies en (7.22).

La représentation $D(\frac{1}{2}0)$ donne un premier doublet, les nucléons :

$$\begin{aligned} \mathrm{p} &= \left|\frac{1}{2}0\frac{1}{2};\frac{1}{2}0\frac{1}{2}\right\rangle & \mathrm{n} &= \left|\frac{1}{2}0\frac{1}{2};-\frac{1}{2}0\frac{1}{2}\right\rangle \\ \overline{\mathrm{p}} &= \left|\frac{1}{2}0\frac{1}{2};-\frac{1}{2}0-\frac{1}{2}\right\rangle & \overline{\mathrm{n}} &= \left|\frac{1}{2}0\frac{1}{2};\frac{1}{2}0-\frac{1}{2}\right\rangle \end{aligned} \tag{7.26}$$

Tandis que le second doublet de $D(0\frac{1}{2})$ donne ce qu'ils nomment les « lambdons » :

$$\begin{aligned} \mathrm{V} &= \left|0\frac{1}{2}\frac{1}{2};0\frac{1}{2}\frac{1}{2}\right\rangle & \Lambda &= \left|0\frac{1}{2}\frac{1}{2};0-\frac{1}{2}\frac{1}{2}\right\rangle \\ \bar{\mathrm{V}} &= \left|0\frac{1}{2}\frac{1}{2};0-\frac{1}{2}-\frac{1}{2}\right\rangle & \overline{\Lambda} &= \left|0\frac{1}{2}\frac{1}{2};0\frac{1}{2}-\frac{1}{2}\right\rangle \end{aligned} \tag{7.27}$$

Dans cette nouvelle classification, la famille des baryons comprend donc seulement quatre membres (et leurs antiparticules associées) : p, n, V et Λ. Ces quatre particules sont considérées comme les particules fondamentales. Elles forment un « Yukawon », évolution du Sakaton auquel est ajoutée la particule V :

$$\Psi = \begin{pmatrix} \mathrm{p} \\ \mathrm{n} \\ \mathrm{V} \\ \Lambda \end{pmatrix} \tag{7.28}$$

Le Yukawon s'étend sur un espace complexe à quatre dimensions, équivalent de celui des spineurs de Dirac. Halbwachs le qualifie ainsi d'isospineur. À la manière des spineurs de Dirac, il est possible de déterminer l'adjoint de Ψ qui fournit le quadruplet des antiparticules :[54]

53. Le principe de la représentation d'un groupe abstrait G consiste à l'étudier à partir d'un objet mathématique directement manipulable, comme les matrices. Par la stratégie du diviser pour mieux régner, l'étude de l'ensemble des sous-représentations $D(l^+l^-)$, avec l^+ et $l^- \in \mathrm{G}$, permet de décrire entièrement le groupe.

54. Francis Halbwachs, « The Rotator of Elementary Particles and the Baryon Masses », *PTP* 32, n° 6 (1964) : 940-949.

$$\bar{\Psi} = \Psi^{\dagger}\gamma^4 = \begin{pmatrix} \bar{\mathrm{p}} & \bar{\mathrm{n}} & \bar{\mathrm{V}} & \bar{\Lambda} \end{pmatrix} \tag{7.29}$$

Ainsi, dans la nouvelle classification, les différents Ξ et Σ ne sont plus considérés comme des baryons, mais comme des hypérons, particules composites. La qualité de baryon est désormais réservée à ces seules quatre particules élémentaires. La théorie prédit en outre l'existence d'une nouvelle particule V dont la masse est estimée à 1540 MeV.[55]

Les autres particules sont formées par le produit tensoriel des représentations irréductibles. À l'aide de la théorie de Clebsch-Gordan, les physiciens décomposent le produit tensoriel $\otimes$ en une somme directe $\oplus$ qui permet de dégager les nouvelles familles de particules. Par exemple, le produit :

$$D(\frac{1}{2}0) \otimes D(\frac{1}{2}0) = D(\underline{0}0) \oplus D(10) \tag{7.30}$$

fait apparaitre deux représentations irréductibles, le singleton $D(\underline{0}0)$ et le triplet $D(10)$, qui donnent la table des mésons π :

$$\pi'^0 = \eta = |\underline{0}00; 000\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\bar{\mathrm{p}}\mathrm{p} - \bar{\mathrm{n}}\mathrm{n}) \tag{7.31}$$

$$\pi^+ = |101; 100\rangle = \bar{\mathrm{n}}\mathrm{p} \tag{7.32}$$

$$\pi^0 = |101; 000\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\bar{\mathrm{p}}\mathrm{p} + \bar{\mathrm{n}}\mathrm{n}) \tag{7.33}$$

$$\pi^- = |101; 000\rangle = \bar{\mathrm{p}}\mathrm{n} \tag{7.34}$$

Les pions sont ainsi composés de nucléons, ce qui correspond à une actualisation de l'ancienne idée de Heisenberg.

Une proposition forte de Yukawa consiste en la séparation des leptons des autres mésons et baryons (bosons) en leur attribuant leur propre groupe $\mathrm{G}' = \mathrm{SO3} \times \mathrm{SO3}'^{+} \times \mathrm{SO3}'^{-}$. Physiquement, ce nouveau groupe correspond à l'inversion des deux repères liés aux points caractéristiques Y_μ et X_μ. Formellement, cela se traduit par une inversion des primes dans les expressions mathématiques.[56] Cette distinction entre les leptons et ce que l'on nomme maintenant les hadrons se justifie afin de les soustraire de l'interaction forte et ainsi définir des lois de conservation qui leur soient propres. En revanche, du point de vue du modèle initial du rotateur relativiste, la suggestion de Yukawa apparait plus artificielle, comme une hypothèse *ad hoc* pour rendre la théorie acceptable vis-à-vis des données expérimentales. Elle offre cependant l'avantage de pouvoir trai-

55. Katayama, Vigier et Yukawa, « Letters to the Editor : An Approach to the Unified Theory of Elementary Particles».

56. Louis de Broglie et al., «Space-Time Model of Relativistic Extended Particles in Minkowski Space. II. Free Particle and Interaction Theory», *Phys. Rev.* 129, n° 1 (1963) : 465–466.

ter symétriquement les baryons et des leptons en regroupant ces derniers au sein d'un quadruplet à la manière de la classification proposée par Nagoya :

$$\Psi = \begin{pmatrix} \mathrm{e}^- \\ \nu_\mathrm{e} \\ \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \tag{7.35}$$

La découverte expérimentale du neutrino muonique ν_μ à Brookhaven au printemps 1962 convainc le groupe d'adopter ce schéma préconisé par Yukawa.[57] Le modèle unifié des particules du groupe IHP s'hybride ainsi avec le modèle des particules de Sakata, en l'agrandissant pour le faire passer d'un triplet à un quadruplet et en substituant le groupe de rotation $\mathrm{SU}(3)$ par le groupe G. De Broglie voit dans ce modèle une actualisation de son ancienne théorie de la fusion dans laquelle les particules de spin 0 et 1 sont construites par un assemblage de particules élémentaires de spin $\frac{1}{2}$.[58] Cependant, ce rapprochement avec la théorie de Sakata ne s'accompagne pas pour autant d'un rapprochement sur les questions interprétatives. Il semble que Vigier n'ait eu aucune interaction avec Sakata et Taketani lors de son séjour au Japon, bien qu'ils partagent tous leur adhésion au matérialisme dialectique. La raison est que Sakata conteste la démarche générale de l'ICMQ, car il considère qu'elle n'apporte aucun nouvel élément sérieux aux débats d'avant-guerre, alors qu'il juge urgent le besoin d'une nouvelle révolution en physique.[59] Ainsi, Sakata ne manifeste aucun intérêt pour les recherches entreprises par le groupe IHP, malgré leur inspiration de son modèle. De leur côté, ni Vigier ni Bohm ne mentionnent la théorie des trois étapes des marxistes japonais (voir section 4.2 page 133) dans leurs écrits concernant de la théorie des niveaux d'organisation de la nature. Ainsi, cette reprise du modèle composite des particules de Sakata s'avère uniquement être la conséquence de l'action de Yukawa qui entretient de bonnes relations avec Sakata et Taketani.

De l'interprétation à la prédiction

Du point de vue de l'histoire de l'ICMQ, une des conséquences les plus importantes de la théorie unifiée des particules est qu'elle acquiert une capacité prédictive. C'est en

57. Gordon Danby et al., «Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos», *Phys. Rev. Lett.* 9, n° 1 (1962) : 36-44.

58. Jean-Pierre Vigier et Louis de Broglie, «Table des particules élémentaires associées au nouveau modèles étendu des particules éllémentaires», *CRAS* 256 (1963) : 3551-3556 ; Louis de Broglie et Jean-Pierre Vigier, «Application de la théorie de la fusion au nouveau modèle étendu de particules élémentaires», *CRAS* 256 (1963) : 3390-3394.

59. Shoichi Sakata, «On Interpretation of the Quantum Mechanics – What is of importance is not interpretation but revolution», Publié originellement dans *Kagaku*, n° 29 (1959) :626–631, *PTP Suppl.* 29, n° 50 (1971) : 171-184.

Représentation $D'(l^+l^-)$	Particule	m'	m^+	m^-	$Q = m^+ + m^- + m'$
$D'(\frac{1}{2}0)$	e^-	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	-1
	ν_e	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
$D'(0\frac{1}{2})$	μ^-	$-\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	-1
	ν_μ	$-\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	0

(a) Leptons

Représentation $D(l^+l^-)$	Particule	m'	m^+	m^-	$Q = m^+ + m^- + m'$
$D(0\frac{1}{2})$	p	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	1
	n	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0
$D(\frac{1}{2}0)$	V	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	1
	Λ	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	0

(b) Baryons

Représentation $D(l^+l^-)$	Particule	m'	m^+	$= m^-$	$Q = m^+ + m^- + m'$
$\mathrm{D}(\frac{1}{2}1)$	X^{++}	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	2
	X^+	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	1	1
	Ξ^0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-1	0
	Ξ^-	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	-1
$\mathrm{D}(1\frac{1}{2})$	Y^{++}	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	2
	Y^+	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	1
	Y^0	$\frac{1}{2}$	-1	$\frac{1}{2}$	0
	Σ^+	$\frac{1}{2}$	1	$-\frac{1}{2}$	1
	Σ^0	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	0
	Σ^-	$\frac{1}{2}$	-1	$-\frac{1}{2}$	-1

(c) Hypérons

Représentation $D(l^+l^-)$	Particule	m'	m^+	m^-	$Q = m^+ + m^- + m'$
$\mathrm{D}(\underline{0}0) + \mathrm{D}(10)$	π'^0	0	0	0	0
	π^+	0	1	0	1
	π^0	0	0	0	0
	π^-	0	-1	0	-1
$\mathrm{D}(\frac{1}{2}\frac{1}{2})$	K^+	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	K^0	0	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	K^-	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1

(d) Mésons

Tab. 7.2: Table des particules (incomplète) déduite du groupe $G = \mathrm{SO3}^+ \times \mathrm{SO3}^- \times \mathrm{SO3}'$

effet une critique récurrente des adversaires de l'ICMQ que celle de son incapacité à sortir de son statut d'interprétation alternative de faits déjà connus de longue date. Les différents tableaux 7.2 listent les principales particules déduites de la théorie des groupes par la méthode de la fusion. Entre autres, il est remarquable qu'un triplet Y et un doublet X, en plus de la particule élémentaire V, fassent leur apparition. Le triplet Y ainsi que V attirent particulièrement l'attention des physiciens après la découverte par Ferro-Luzzi à Berkeley en 1962 d'un hypéron de masse 1520 MeV en résonance de la diffusion $\mathrm{K}^- \mathrm{p}$.[60] Pour Vigier, il s'agit potentiellement de la confirmation de l'existence de Y^+, ou éventuellement de V pour lesquels la masse devrait se situer dans les mêmes ordres de grandeur.[61] Lorsqu'il apprend la nouvelle au Japon, Vigier se montre, à son habitude, très optimiste. Il partage sa joie avec Bohm pour ce qui s'annonce déjà être la première victoire de leur modèle :

> C'est si important que Yukawa m'a demandé de rester jusqu'à la fin juin où nous aurons une confirmation définitive. Je te tiendrai au courant au début de juin à quelle date je propose d'aller Londres. J'écris à Éric demain.
>
> Naturellement, s'il te plait garde strictement tout ceci pour toi puisque toute fuite serait mauvaise avant la publication. À ce sujet, Yukawa a affiché un grand et je danse comme le Phœnix (un célèbre oiseau japonais).[62]

La particule découverte par Ferro-Luzzi ne correspond cependant ni à Y^+ ni à V et s'avère être un Λ.[63]

7.2.5 Un programme de recherche doublement ignoré

À partir de 1964, le programme de recherche en physique des particules du groupe IHP marque un net ralentissement et la densité de publications diminue. L'explication la plus évidente est la victoire du programme de la Voie octuple, poursuivi par Gell-Mann et Ne'eman, sur son principal concurrent, le modèle de Nagoya auquel il est possible de rattacher le modèle du rotateur. La découverte expérimentale de Ω^- en 1964 vient en effet compléter le décuplet des baryons de spin $\frac{3}{2}$ (voir figure 7.1 page 199) et ainsi asseoir le modèle. La suite de l'histoire est bien connue : la Voie octuple engendre la théorie des quarks par Gell-Mann[64] et son équivalent, les « aces», par Zweig qui

60. Massimiliano Ferro-Luzzi, Robert D. Tripp et Mason B. Watson, «Excited hyperon of mass 1520 Mev», *Phys. Rev. Lett.* 8, n° 1 (1962) : 28-31.
61. Francis Halbwachs et Jean-Pierre Vigier, «Theoretical Prediction of New Heavy Bosons (Especially Heavy K-Mesons) in the Frame of the Rotator Model of Elementary Particles», *Nuovo Cimento* xxx, n° 1 (1963) : 469-475.
62. Vigier, Jean-Pierre Vigier à David Bohm.
63. D'après les données du Particle Data Group, la particule est appelée lambda $\Lambda(1520)$. Patrignani Claudia et al., «Review of Particle Physics», *Chinese Physcis C* 40, n° 10 (2016).
64. Murray Gell-Mann, «A schematic model of baryons and mesons», *Phys. Let.* 8, n° 3 (1964) : 214-215.

va progressivement s'imposer dans la communauté.[65] L'évidence des quarks convainc vraisemblablement les physiciens des maigres perspectives d'avenir de leur entreprise. Le modèle des quarks constitue un changement paradigmatique important par l'introduction de nouveaux constituants élémentaires de la matière afin d'expliquer la composition de ceux déjà connus, tandis que les modèles précédents, dont celui du rotateur et de Nagoya, partent de particules déjà connues afin d'en déduire les particules plus massives. De plus, le confinement des quarks au sein des mésons, composés d'un quark et d'un antiquark, et des baryons, composés de trois quarks, qui les rend par principe inobservables interroge sur le statut qu'il faut leur attribuer, entre entité réelle ou objet purement mathématique.

Au bilan, le programme des particules est demeuré confidentiel et ignoré par la communauté des physiciens, comme en témoigne une étude de sa réception qui s'appuie sur des données scientométriques collectées par le Web of Science. Bien qu'elles ne soient pas exhaustives, ces données permettent néanmoins d'obtenir un bon aperçu de l'impact et de la diffusion d'un article.[66] Parmi l'ensemble de la production en rapport avec le programme de physique des particules du groupe IHP, les trois articles les plus cités jusqu'à aujourd'hui sont « Rotator Model of Elementary Particles Considered as Relativistic Extended Structures in Minkowski Space »[67] (47 citations), « Relativistic Rotators and Bilocal Theory »[68] (36 citations) et « An Approach to the Unified Theory of Elementary Particles »[69] (19 citations). Les autres articles ne dépassent pas quant à eux la dizaine de citations. Pour donner un point de comparaison, le premier article de Bohm de 1952 est cité en moyenne 9,2 fois par ans sur les cinq premières années après sa parution en dépit de la « conspiration du silence » dont se plaint son auteur.[70] Nous n'avons malheureusement pas pu réaliser la comparaison avec l'article conjoint de Bohm et Vigier de 1953 qui démontre la règle de Born. Les données des citations sur ce second article sont manifestement partielles et donc non probantes.[71] Il faut de plus ajouter que parmi toutes ces citations, une majorité correspond en réalité soit à des autocitations, soit à des citations d'autres membres du groupe qui publient sur le même sujet (35/47, 11/36 et 11/19).

Ces quelques données ne laissent guère place au doute sur la faible pénétration

65. George Zweig, « An SU(3) model for strong interaction symmetry and its breaking », *CERN Report* 8182/TH. 401 (1964) ; George Zweig, « An SU(3) model for strong interaction symmetry and its breaking II », *CERN Report* 8419/TH. 412 (1964).

66. Ces données ne sont pas complètes puisque le Web of Science ne recense pas toutes les revues.

67. de Broglie et al., « Rotator Model of Elementary Particles Considered as Relativistic Extended Structures in Minkowski Space ».

68. Bohm et al., « Relativistic Rotators and Bilocal Theory ».

69. Katayama, Vigier et Yukawa, « Letters to the Editor : An Approach to the Unified Theory of Elementary Particles ».

70. Pour une analyse approfondie de la réception de l'article de Bohm, voir : Freire Jr., *The Quantum Dissidents*, 63–66.

71. Aucune année n'est recensée entre 1956 et 1969, ce qui est manifestement un manque de référencements.

des travaux du groupe IHP dans la communauté. Indéniablement, certains choix théoriques placent le modèle à contrecourant du mouvement dominant. En particulier, le choix du groupe de rotation G à la place de SU(3), qui est pourtant préféré par la plupart des théories préquarks, comme ceux de Sakata/Nagoya ou de la Voix octuple, et qui sera également retenu par Gell-Mann et Zweig pour les quarks. Ce choix exotique a probablement privé les physiciens du soutien de Sakata et Taketani, bien que le modèle dans sa version la plus élaborée fasse un pas important en direction de celui des Japonais. De plus, il aucune des nouvelles particules prédites n'a été détectée expérimentalement, en particulier V qui est pourtant fondamentale pour la cohérence du modèle.

À côté de ces facteurs théoriques, d'autres de nature sociologique s'ajoutent pour aggraver la faible audience de ces travaux. D'une part, il y a le choix de principalement publier dans *PTP*. La revue fondée par Yukawa est en effet peu lue en dehors de l'Archipel, au grand désespoir d'ailleurs des physiciens japonais. Kent Staley l'illustre par un exemple plus tardif, celui de l'article de Kobayashi et Maskawa de 1973, le premier à s'appuyer sur un modèle à six quarks, qui est complètement ignoré par les Européens et les Américains jusqu'en 1975.[72] D'autre part, le groupe IHP fonctionne en vase clos sans être véritablement en contact avec le reste de la communauté. La collaboration avec les physiciens japonais à Kyoto demeure une exception qui ne doit pas masquer la réalité. Hormis Bohm et Takabayasi, les contributeurs sont tous des physiciens français, jeunes pour la plupart, que Vigier parvient à convaincre de travailler avec lui à l'IHP. Ce point est à mettre en perspective avec l'absence de participation aux nouvelles dynamiques en France qui se créent après la guerre et qui visent notamment à tisser de meilleurs liens internationaux. En particulier, l'École d'été des Houches, créée en 1951 par la jeune Cécile Morette, qui s'impose rapidement comme le lieu privilégié pour les jeunes physiciens d'acquérir une formation théorique de pointe. Bien que Morette ait fait appel à de Broglie, celui-ci ne s'est pas investi outre mesure pour soutenir l'initiative.[73] Enfin, il ne faut pas négliger la réputation sulfureuse dont jouit le groupe IHP. En inscrivant le modèle des particules dans la continuité de l'icmq, avec comme finalité de proposer un modèle « réaliste» des particules élémentaires, le groupe n'a alors que peu de chances de pouvoir fédérer autour de lui.

Toutefois, le programme n'est pas totalement stérile. L'Israélien Moshé Flato, qui séjourne à l'IHP en 1963 et 1964 avant de rejoindre Lyon jusqu'en 1967, s'intéresse de

72. Staley, *The Evidence for the Top Quark*, 27–36.
73. Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960)», 225.

près au modèle.[74] Halbwachs poursuit également les recherches de son côté en introduisant un nouveau groupe de rotation en lieu et place de G.[75] Dans une autre voie, les physiciens japonais Osamu Hara et Tetsuo Goto s'en sont inspiré dans dans la perpective d'y intégrer les quarks.[76] Takabayasi a également poursuivi indépendamment le modèle dans les années 1970, en changeant toutefois complètement de perspective. Il substitue en effet le rotateur relativiste par une corde vibrante et élastique en s'inspirant des travaux de Gabriele Veneziano, le pionnier de la théorie des cordes.[77] Ainsi, la caractéristique commune à ces recherches est que tout en maintenant l'esprit initial du modèle du rotateur relativiste, c'est-à-dire d'associer à chaque nombre quantique un degré de liberté interne de la particule dans une perspective réaliste, elles s'en sont sensiblement écartées.

Cette confidentialité des travaux du groupe IHP en physique des hautes énergies s'est accompagnée d'une absence de son traitement par les historiens des sciences spécialistes de la physique des hautes énergies. En effet, parmi toutes les références à la littérature secondaire citées, pas une seule ne mentionne ne serait-ce que l'existence de ce programme, qui est probablement à ranger aux côtés de ce que certains appellent les « voies sans issue » (*blind alley*).[78] D'un autre côté, les historiens qui se concentrent sur l'histoire de la controverse sur les fondements de la mécanique quantique n'ont pas non plus pris en compte ces travaux, dans la mesure où leur rattachement à l'ICMQ n'est au premier abord pas évident, tant le support théorique diverge des premiers travaux de Bohm, de Broglie et Vigier. Dans la suite de ce chapitre, nous allons montrer que la prise en compte de la théorie des particules est pourtant pertinente dans la perspective d'une compréhension globale de l'ICMQ.

74. David Bohm et al., « On the "Space-Time Character" of Internal Symmetries of Elementary Particles », *Nuovo Cimento* XXXVI, n° 61 (1965) : 672-675 ; Moshé Flato, Georges Rideau et Jean-Pierre Vigier, « Definition of P.C.T. operators for the relativistic-rotator model and the Bronzan-Low symmetry », *Nuclear Physics* 61 (1965) : 250-256 ; Moshé Flato et al., « On the masses of nonstrange pseudoscalar mesons and the generalized Klein-Gordon equation », *Nuovo Cimento A* 42, n° 2 (1966) : 431-434.

75. Francis Halbwachs, « The conformal group as a candidate for the relativistic extension of elementary particle symmetries », *Nuovo Cimento A* 49, n° 4 (1967) : 517-539.

76. Osamu Hara et Tetsuo Goto, « Rigid Sphere Model of Elementary Particles and the Electromagnetic Field », *PTP* 33, n° 5 (1965) : 907-931 ; Osamu Hara et al., « Deformable Sphere Model of Elementary Particles and its Relation to Quark », *PTP* 39, n° 1 (1968) : 203-227.

77. Takehiko Takabayasi, « Theory of One-Dimensional Relativistic Elastic Continuum for the Model of Particles and Resonances », in *Quantum Mechanics, Determinism, Causality, and Particles*, sous la dir. de M. Flato et al. (Dordrecht : D. Reidel Publishing Company, 1976), 179-216.

78. Val L. Fitch et Jonathan L. Rosner, « Elementary particle physics in the second half of the 20th century », in *Twentieth Century Physics*, sous la dir. de Laurie M. Brown, Abraham Pais et Brian Pippard, t. 2 (Londres : Taylor & Francis Ltd, 1995), 637.

7.3 Retour sur la notion de classicisme dans l'ICMQ

En conclusion de ce chapitre, nous allons synthétiser la relation qu'entretient l'ICMQ avec la mécanique classique à partir des différentes études de cas qui ont constitué l'objet de cette thèse : les théories de la double solution et de l'onde pilote de de Broglie, les variables cachées de Bohm, la thèse de Vigier, les diverses représentations hydrodynamiques de la mécanique quantique et, pour terminer, le modèle des particules.

7.3.1 Les significations de la quantification dans les interprétations standard et causale

La transition classique-quantique dans l'ICMQ

En mettant le modèle des particules de côté, la particularité de l'ensemble de ces représentations classiques est que l'aspect quantique se manifeste par une nouvelle propriété. Dans l'onde pilote et la double solution, cet effet quantique est interprété par de Broglie comme une correction de la masse :

$$M_0 = \sqrt{m_0^2 - \frac{h^2}{4\pi^2 c^2}\frac{\Box a}{a}} \tag{7.36}$$

Chez Bohm, il se manifeste par le potentiel quantique :

$$Q = \frac{h^2}{4\pi^2}\frac{\nabla^2 a}{a} + \frac{h^2}{4\pi^2 c^2}\frac{\ddot{a}}{a} \tag{7.37}$$

Dans ses premiers travaux, Vigier espère pouvoir représenter ce potentiel comme une singularité du champ, au même titre que les champs électromagnétiques et gravitationnels. Dans la représentation hydrodynamique de Takabayasi intervient une pression quantique :

$$p = \frac{\hbar^2}{6m}((\boldsymbol{\nabla}\sqrt{\rho})^2 - \rho\Delta\rho) \tag{7.38}$$

Toutes ces représentations différentes sont mathématiquement parfaitement équivalentes et se déduisent les unes des autres. Dans le même esprit, le modèle hydrodynamique de l'équation de Pauli proposé par Bohm, Tiomno et Schiller exprime également les effets quantiques liés au spin par l'introduction d'un nouveau potentiel spécifique :

$$Q_s = \frac{\hbar^2}{8m}\rho((\boldsymbol{\nabla}\theta)^2 + \sin^2\theta(\boldsymbol{\nabla}\varphi)^2) \tag{7.39}$$

Dans ces différentes représentations classiques, la mécanique quantique vient ainsi compléter la mécanique classique par de nouvelles interactions. En faisant tendre h vers 0, les effets quantiques disparaissent, suggérant une continuité entre les théories classique et quantique, équivalente au principe de correspondance de Bohr. La transition entre les comportements quantique et classique s'opère lorsque les nombres quantiques sont grands, autrement dit, lorsque la constante de Planck peut être négligée. Cependant, la continuité classique-quantique est cependant en trompe-l'œil. Ces nouveaux potentiels et interactions renferment des comportements qui ne sont pas aussi triviaux à modéliser que leurs homologues classiques.

La transition classique-quantique dans l'ISMQ

Dans l'ISMQ, la transition classique-quantique s'effectue d'une tout autre manière. Il est réalisé par la procédure mathématique standardisée appelée « quantification canonique». Cette procédure, décrite par Dirac en 1925 et 1926 alors qu'il était encore étudiant, consiste à substituer le crochet de Poisson de la mécanique classique de deux fonctions u et v de l'espace des phases :[79]

$$\{u, v\} = \sum_i \left(\frac{\partial u}{\partial q_i} \frac{\partial v}{\partial p_i} - \frac{\partial u}{\partial p_i} \frac{\partial v}{\partial q_i} \right) \tag{7.40}$$

par des relations de commutation, ou « crochet de Poisson quantique» selon la terminologie de Dirac :

$$uv - vu = i\hbar[u, v] \tag{7.41}$$

En conséquence, les crochets de Poisson des coordonnées canoniques p_i et q_i classiques :

$$\left\{p_i, q_j\right\} = \delta_{ij}, \quad \left\{q_i, q_j\right\} = \left\{p_i, p_j\right\} = 0 \tag{7.42}$$

sont remplacés par les relations de commutation entre les opérateurs quantiques $\hat{p}_i$ et $\hat{q}_i$:

$$\left[\hat{p}_i, \hat{q}_j\right] = i\hbar\delta_{ij}, \quad \left[\hat{q}_i, \hat{q}_j\right] = [\hat{p}_i, \hat{p}_i] = 0 \tag{7.43}$$

Ces dernières relations constituent la structure fondamentale de l'algèbre des q-nombres,(*quantum numbers* ou *queer numbers*), qui viennent supplanter les nombres classiques (*c-numbers*). Les variables dynamiques classiques sont remplacées par des

79. Paul A. M. Dirac, «The Fundamental Equations of Quantum Mechanics», *Proc. R. Soc. A* 109, n° 752 (1925) : 642-653 ; La procédure est également détaillée dans son célèbre manuel de mécanique quantique : Paul A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, 4e édition (1930 ; Oxford : Oxford University Press, 1958), 84–89 ; À propos de la genèse de l'algèbre de Dirac, voir : Darrigol, *From c-Numbers to q-Numbers*, 309–328 ; Kragh, *Dirac*, 14–47.

observables quantiques qui sont des opérateurs hermitiens.[80] Cette nouvelle algèbre généralise le principe de correspondance de Bohr. Pour Dirac, la correspondance entre les deux mécaniques « ne se situe pas tellement dans l'accord à la limite lorsque $h \to 0$ que comme le fait que les opérations mathématiques des deux théories obéissent dans de nombreux cas aux mêmes lois. »[81]

La quantification canonique de Dirac est en quelque sorte une recette universelle permettant de construire une théorie quantique à partir de n'importe quelle théorie classique. Dans la perspective de son auteur, elle est un pas important en direction d'une physique neutre du point de vue interprétatif.[82] Il existe tout de même une forte restriction à la procédure puisque toutes les observables quantiques soumises aux relations de commutation des q-nombres n'ont pas nécessairement d'équivalents classiques. C'est le cas du spin, mais également de l'onde Ψ, dont la quantification à l'origine de la TQC (parfois appelée « seconde quantification ») parait à cet égard artificielle, même si elle est totalement justifiée par l'axiomatique de l'ISMQ.[83] Ainsi, il n'est pas possible de déduire l'ensemble des théories quantiques à partir des seules théories classiques quantifiées.

La quantification canonique de Dirac apparait complètement étrangère à l'esprit classique de l'ICMQ. Elle est en effet consubstantielle à la mesure puisque les opérateurs hermitiens soumis aux relations de commutation définissent les observables du système. Le principal apport de l'article de Bohm de 1952 est bien d'avoir proposé une théorie classique de la mesure qui n'a pas recours aux q-nombres. Pour Bohm, il n'existe pas de fondement ontologique justifiant un traitement différencié de la mesure par rapport aux autres types d'interactions. Ainsi, la théorie des variables cachées n'est pas une théorie quantique au sens de l'ISMQ. De même, dans la théorie de Pauli de l'électron, Bohm dérive les équations du mouvement à partir des crochets de Poisson classiques (voir la section 6.1.2 page 183). À ce propos, il critique d'ailleurs vertement Takabayasi lorsque celui-ci quantifie les équations hydrodynamiques, ce qui équivaut à une seconde quantification, pour son incohérence (voir section 4.3.3 page 143). Dans la même idée, de Broglie reproche le caractère peu descriptif de la TQC qui définit les fermions et les bosons par des relations de commutation et d'anticommutation entre les fonctions d'onde quantifiées. Il ne conteste pas l'exactitude des formules, mais il ajoute qu'il est « difficile de penser qu'elle nous fasse comprendre ce que sont dans la réalité physique les bosons et les fermions. »[84]

80. Les opérateurs hermitiens possèdent entre autres la propriété d'être à valeurs propres réelles. Ces valeurs propres correspondent aux différentes valeurs que peut prendre l'observable lors d'une mesure.
81. Dirac, « The Fundamental Equations of Quantum Mechanics », 649.
82. Luisa Bonolis, « From the Rise of the Group Concept to the Stormy Onset of Group Theory in the New Quantum Mechanics. A saga of the invariant characterization of physical objects, events and theories », *Nuovo Cimento* 4–5 (2004) : 52–53.
83. Darrigol, « The Origin of Quantized Matter Waves », 197–198.
84. Louis de Broglie, « L'interprétation de la mécanique ondulatoire », *JPR* 20, n° 12 (1959) : 979.

Dans l'introduction de son article sur la représentation hydrodynamique de l'équation de Dirac, Takabayasi précise ce qu'il qualifie de « bifurcation » en physique, entre les représentations classique et quantique :

> La mécanique quantique divise une *situation physique* en une paire de concepts plus fondamentaux et irréductibles, *le vecteur d'état* et *l'opérateur de grandeur physique*, dont aucun n'est directement observable : alors que dans la théorie classique, les deux concepts (état et grandeur physique) ne sont pas fondamentalement différenciés et, en outre, ils sont des observables. C'est cet état actuel des choses qui a été qualifié de « bifurcation des concepts en mécanique quantique ».[85]

Ainsi, pour Takabayasi la réelle rupture créée par la mécanique quantique est la séparation opérée entre l'état du système, symboliquement représenté dans l'ISMQ par un vecteur d'état $|\psi\rangle$, et les opérateurs qui s'appliquent au vecteur d'état et qui définissant les observables ($\hat{\boldsymbol{r}}$ pour la position, $\hat{\boldsymbol{p}}$ pour la quantité de mouvement, $\boldsymbol{s}$ pour le spin).[86] Par contraste, en mécanique classique l'état du système est directement défini par les grandeurs physiques observables (position $\boldsymbol{x}$ et quantité de mouvement $\boldsymbol{p}$).

Cependant, bien que l'axiomatique de la mécanique quantique soit différente de celle de la mécanique classique, Takabayasi rappelle que les résultats des expériences s'expriment toujours dans un langage classique, conformément à la complémentarité bohrienne. En conséquence, la problématique qui se pose est de savoir dans quelle mesure s'il ne serait pas possible d'exprimer les lois quantiques classiquement, c'est-à-dire sans séparer l'état du système des grandeurs observables :

> Ce devrait être un problème important, tout d'abord *en principe*, de se demander si l'on peut supprimer cette bifurcation « fondamentale » dans la mécanique quantique et parvenir à une formulation de la théorie uniquement à l'aide de conceptions classiques. La mécanique quantique remplit l'exigence que toutes les prédictions dérivées de celles-ci devraient être exprimées avec des termes classiques même si les explications elles-mêmes transcendent le champ d'application classique. [...] Notre tâche est, cependant, de montrer qu'il est en quelque sorte possible de fonder une construction de la mécanique quantique qui exprime non seulement les résultats, mais également toute la constitution interne de la théorie en termes clas-

85. « Quantum mechanics divides up a *physical situation* into a pair of more fundamental and irreducible concepts, *state vector* and *physical quantity operator*, neither of which is directly observable thing : Whereas in classical theory, both concepts (state and physical quantity) are not differentiated essentially, and in addition they are observables. This is the state of affairs which has been referred to as a basic "bifurcation of concepts in quantum mechanics".» Takehiko Takabayasi, « Relativistic Hydrodynamics of the Dirac Matter », *PTP Suppl.* 4 (1957) : 2.

86. Concrètement, dans l'espace des positions, $\hat{\boldsymbol{r}} = \boldsymbol{r}$ et $\hat{\boldsymbol{p}} = -i\hbar\boldsymbol{\nabla}$. En appliquant $\hat{\boldsymbol{r}}$ à $|\psi\rangle$, on obtient la fonction d'onde $\psi(\boldsymbol{r}) \equiv \langle \boldsymbol{r}|\psi\rangle$. La probabilité de trouver la particule en $\boldsymbol{r}$ est $|\Psi(\boldsymbol{r})|^2$.

siques.[87]

Ainsi, dans la perspective de Takabayasi, la question de l'indéterminisme devient secondaire pour l'ICMQ. Son caractère déterministe apparait par voie de conséquence, parce que son formalisme sous forme d'équations différentielles assure le respect du principe de causalité. Ainsi, si la question de l'indéterminisme est originellement au cœur de la préoccupation des physiciens, en témoignent la correspondance entre Bohm et Schatzman de 1951 (voir la section 2.2.1 page 63), l'objet de ICMQ a su largement évoluer. La preuve la plus flagrante de cette évolution est l'introduction des fluctuations aléatoires à l'intérieur du fluide quantique qui est absent des interprétations initiales de Bohm et de de Broglie.

7.3.2 Les fonctions de la représentation classique de la mécanique quantique

Après avoir précisé la signification de la représentation classique des phénomènes quantiques pour les partisans de l'ICMQ, il y a lieu d'interroger sa fonction. C'est-à-dire les raisons pour lesquelles ces physiciens les préfèrent aux représentations quantiques. Nous avons identifié quatre fonctions distinctes que nous nommerons : réaliste, épistémologique, heuristique et pragmatique.

Fonction réaliste

La fonction la plus immédiate d'une formulation classique de la mécanique quantique, que nous avons eu largement eu l'occasion d'expliciter au cours de cette thèse, est de répondre à une exigence de réalisme scientifique. La séparation opérée par l'ICMQ entre les observables et l'état du système exige en effet de reconsidérer en profondeur le concept d'objectivité en raison du contextualisme qu'elle introduit. Le désaccord entre, d'un côté, Rosenfeld et, de l'autre, Bohm, Vigier et Feyerabend lors de la conférence de 1956 à Bristol porte précisément sur ce point (voir la section 5.2.4 page 168). Selon Rosenfeld, le contextualisme n'est pas contradictoire avec l'objectivité puisque les résultats d'une mesure demeurent indépendants d'un observateur particulier (pas d'intervention de la conscience). Les partisans de l'ICMQ, appuyés par Feyerabend, récusent de leur côté ce qu'ils considèrent être une restriction injustifiée à l'objectivité puisqu'alors il n'est plus possible de mentionner l'état du système en dehors d'un

87. « It should then be an important problem, first of all *in principle*, to inquire whether one can suppress that "basic" bifurcation in quantum mechanics and attain a formulation of the theory in terms of classical conceptions only. Quantum mechanics fulfils the requirement that all of the predictions derived therefrom should be expressed in classical terms even though the explanations themselves transcend the scope of classical ones. [...]Our task is, however, to show that it is in a sense possible further to set up a construction of quantum mechanics which expresses not only the resulting prescription but also the whole internal constitution of the theory itself in classical terms alone.» Takabayasi, « Relativistic Hydrodynamics of the Dirac Matter », 2.

contexte expérimental particulier. Pour eux, l'état du système existe en soi et les mesures révèlent des propriétés intrinsèques, bien qu'ils admettent qu'en raison du quantum d'action certaines restrictions quant à la précision apparaissent par rapport au cas classique.

Fonction épistémologique

Dans une perspective épistémologique, le formalisme classique possède l'avantage de sa clarté et de son intuitivité. En bons cartésiens, de Broglie et Vigier sont attachés à la description des phénomènes physiques dans un cadre spatiotemporel qui en permet une décomposition en mouvements simples. En particulier, de Broglie est insatisfait de l'évolution de l'équation d'onde dans l'espace de configuration et tente à plusieurs reprises de subdiviser cet espace en des espaces réels (voir les sections 1.1.4 page 30) et 3.3 page 109). Dans le modèle de la gouttelette de Bohm-Vigier, l'idée est de décrire l'ensemble des propriétés quantiques (isospin, étrangeté, nombre baryonique) comme autant de rotations élémentaires dans l'espace-temps. Takabayasi exprime ce même désir de clarté lorsqu'il présente la théorie des particules à l'occasion du séminaire de physique de Yukawa en 1960 :

> Nous partons d'un modèle classique parce que nous souhaitons considérer le problème d'un point de vue libre de la situation actuelle de la théorie des particules élémentaires qui tourne en rond dans le modèle de la théorie quantique des champs. Nous souhaitons avoir une image classique claire de ce qui se passe dans la matière à l'intérieur des particules dans le sens du principe de correspondance.[88]

L'argument de la clarté des représentations classique explique pourquoi le modèle des particules est préalablement formulé classiquement avant d'être quantifié. Sur le principe, rien n'empêchait de partir directement d'une théorie quantique. Cette idée d'une physique classique intrinsèquement plus intelligible et intuitive que la physique quantique comporte à notre avis une part de subjectivité. Le caractère « intuitif » de la physique classique, en l'occurrence sous sa forme « achevée » la mécanique analytique, n'a en effet rien d'inné. Lorsque Lagrange l'introduit au XVIIIe siècle, bien que son l'adoption par la communauté des savants s'effectue relativement rapidement pour un ensemble de facteurs techniques et épistémologiques, rares ne sont pas ceux qui continuent d'employer le langage géométrique de Newton et Huyghens du XVIIe siècle, précisément parce qu'ils le considèrent plus intuitif et moins abstrait, donc plus

88. « We start with a classical model because we wish to look at the problem once from a point of view free from the present situation of the elementary-particle theory which is going round and round in circles within the pattern of quantum field theory. We wish to have a clear classical picture of what is going on in the materials inside the particles in the sense of the correspondence principle. » Ezawa, « Takehiko Takabayashi (1919–1999) », 296.

adéquat pour décrire la réalité.[89] Les nouvelles théories physiques s'accompagnent en général de nouvelles mathématiques qui se heurtent aux habitudes et aux traditions en place au sein d'une communauté. En 1925, Ehrenfest compare Heisenberg à Newton en cela qu'il a inventé à la fois une nouvelle physique et les mathématiques qui l'accompagnent, l'algèbre matricielle non commutative.[90] L'explication de la faible pénétration de la mécanique quantique dans la France de l'entre-deux-guerre n'est pas à chercher du côté d'une opposition de principe des physiciens aux nouvelles théories. Elle est en bonne partie la conséquence de l'effort nécessaire d'appropriation et de mise à niveau, considéré trop important par ces physiciens en comparaison des gains qu'ils entrevoient, probablement à tort, dans leurs domaines de recherche.[91] Un autre exemple qui se rattache directement à ce chapitre est celui de la théorie des groupes introduits par Wigner à la fin des années 1920. Avant que les groupes de symétries n'acquièrent un rôle fondamental en mécanique quantique pour devenir le langage naturel de la physique des particules, ils se sont heurtés aux réticences d'une communauté qui les perçoit comme excessivement abstraits et qui obscurcissent plus qu'ils n'aident la résolution des problèmes physiques.[92] Les mathématiques sont par essence abstraites et l'affirmation des physiciens de IHP que le formalisme classique serait le langage naturel des représentations intuitives comporte un biais cognitif évident.

Fonction heuristique

La capacité heuristique des représentations classiques est un argument principalement mobilisé par Takabayasi lorsqu'il reprend la formulation hydrodynamique de la mécanique quantique de Madelung (voir la section 4.3 page 141). En effet, Takabayasi se distingue des autres membres du groupe IHP par sa prise de distance avec les interprétations ontologiques des représentations classiques. Il considère la pluralité des interprétations de la mécanique quantique bénéfique, car elle permet d'éclairer un même objet sous des angles différents. Il accorde aux représentations classiques la faculté de permettre une meilleure visualisation des transitions d'états que ne le permet l'ISMQ.

Dans un contexte différent, la thermodynamique cachée des particules de de Broglie s'appuie elle aussi sur une utilisation heuristique de l'hypothèse du milieu sub-

89. Niccolò Guicciardini, «Mathematics and the New Sciences», chap. 8 in *The Oxford Handbook of the History of Physics*, sous la dir. de Jed Z. Buchwald et Robert Fox (Oxford : Oxford University Press, 2013), 260–261.

90. Mehra et Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 4*, 232.

91. Adrien Vila Valls, «Entre causalisme et positivisme La réception épistémologique de la mécanique quantique par les théoriciens français de la génération de l'entre-deux-guerres», *Revue d'histoire des sciences* 68, n° 2 (2015) : 475-507.

92. Bonolis, « From the Rise of the Group Concept to the Stormy Onset of Group Theory in the New Quantum Mechanics. A saga of the invariant characterization of physical objects, events and theories», 65.

quantique de Bohm et Vigier (voir la section 5.2.5 page 175).

Fonction pragmatique

La dernière fonction remplie par la représentation classique est avancée par Halbwachs dans sa thèse et nous la qualifions de pragmatique. Pour Halbwachs, l'utilisation de telles représentations est justifiée puisqu'elles ont su montrer leur efficience au cours de l'histoire :

> On peut de bon droit reprocher à un tel modèle d'être arbitrairement « mécaniste». Le fluide classique est, certes, un « élément» de notre intuition courante (au sens des quatre « éléments» de la physique antique). Il est à ce titre tiré de l'expérience grossière de la matière à notre échelle. Mais il faut remarquer que, dans ces conditions, il n'est ni plus ni moins « mécaniste» que le solide classique. Constituer un fluide – d'ailleurs purement représentatif – au moyen de corpuscules qui sont eux-mêmes des gouttelettes liquides, c'est là certes une démarche discutable, mais elle ne l'est ni plus ni moins qu'une hypothèse qui constitue les gaz, les liquides et les solides au moyen de corpuscules qui sont eux-mêmes conçus comme de petits grains solides. Or c'est là la démarche de tous les physiciens atomistes depuis Démocrite, c'est-à-dire, sous sa forme précise et déterminée, ce que M. Louis de Broglie appelle « la représentation cartésienne des phénomènes par figures et mouvements».

Cet argument de type preuve par les faits est une réponse de Halbwachs aux « nombreux philosophes», qu'il ne nomme, mais qui critiqueraient par principe le recours aux concepts classiques. Pour être cohérent avec lui-même, Halbwachs précise qu'il faut savoir les mobiliser avec parcimonie et connaitre les limites de leur validité :

> Cette démarche, réfutée *a priori* un très grand nombre de fois par les philosophes, est pourtant celle qui, entre les mains des physiciens et des chimistes, a conduit à d'éclatants succès dans de nombreux domaines et donné naissance à des édifices admirables tels que la théorie cinétique des gaz, la théorie moléculaire des cristaux, la stéréochimie du carbone, etc... Alors cette conception peut être taxée de mécanicisme et rejetée sans regret dans les cas où elle échoue (théorie mécanique de l'éther par exemple). Toutes les fois qu'elle réussit au contraire à rendre compte correctement des phénomènes, il est légitime de lui faire confiance pour son efficacité pratique, et il est également légitime de voir dans cette efficacité même le reflet d'une signification physique plus profonde.[93]

La pirouette finale de Halbwachs permet néanmoins un retour au réalisme. Son pragmatisme n'a ainsi rien de comparable avec celui plus dominant la physique américaine depuis les années 1920 et caractérisé par Schweber, selon la formule de William

93. Halbwachs, « Recherches sur la mécanique du corpuscule tournant relativiste et l'hydrodynamique relativiste des fluides dotés d'une densité de moment angulaire interne», 55–56.

James, par le règne du « tempérament empiriste» et l'abandon du « tempérament rationaliste».[94]

Vigier exprime une idée semblable quand il affirme que la mécanique classique est vraie dans son domaine et que ses succès empiriques en sont la preuve la plus évidente.[95] Pour des marxistes, cet argument est à rapprocher de ce que Lénine appelle le « critère de la pratique» qui, d'après Marx, stipule que « poser en dehors de la pratique la question de savoir "si la pensée humaine peut aboutir à une vérité objective", c'est s'adonner à la scolastique.»[96] Ce critère de la pratique peut s'entendre de deux manières différentes. Dans un sens restreint, il s'agit de l'expérience, la phrase de Lénine signifie alors trivialement que toute théorie doit être corroborée par l'expérience. Dans un sens plus large et en phase avec un marxisme interprété en tant que théorie de l'action, la pratique exprime alors plus généralement la capacité des individus à transformer le monde dans lequel ils évoluent. Selon Boukharine, l'expérience est l'un des mécanismes médiateurs entre la théorie et la pratique.[97] Dans cette perspective, l'efficience des représentations classiques reflète leur capacité à saisir et à transformer le réel, ce qu'exprime la dernière phrase de Halbwachs.

7.3.3 Le modèle des particules : entre rupture et continuité

À l'aune de cette synthèse de la signification du concept de classicisme dans l'ICMQ, le modèle des particules interroge par les ruptures qu'il introduit avec certains des principes énoncés précédemment. Ainsi, il est légitime de questionner sa filiation avec le reste des travaux du groupe IHP.

La première rupture intervient lors de la quantification des rotations internes de la gouttelette de Bohm-Vigier. La justification de cette quantification par son résultat – principalement sa capacité de retrouver la loi empirique de Gell-Mann-Nishijima – n'est pas rationnellement acceptable et les auteurs en ont pleinement conscience, même si cet accomplissent théorique est à l'occasion mise en avant par les physiciens. La justification avancée de la quantification est de type semi-classique. En analogie avec l'atome de Bohr, les différents états propres du rotateur sont associés aux états stables de sa fonction d'onde interne. Dans cette perspective, la quantification précise les modes de rotations internes autorisés. Dans la continuité, Barbieri, Depaquit et Vi-

94. Schweber, « The Empiricist Temper Regnant : Theoretical Physics in the United States 1920-1950» ; À propos de l'influence du pragmatisme de James et de Pierce dans la naissance de l'« Interprétation de Copenhague, voir :» Reza Maleeh et Parisa Amani, «Pragmatism, Bohr, and the Copenhagen interpretation of quantum mechanics», *ISPS* 27, nº 4 (2013) : 353-367.

95. Vigier, « Théorie des niveaux dialectique de la nature», 43.

96. Lénine, *Matérialisme et Empiriocriticisme*.

97. Nikolai Bukharin, *Philosophical Arabesques*, trad. Renfrey Clarke (1938 ; New York, NY : Monthly Review Press, 2005), 122.

gier proposent que l'énergie émise ou absorbée par « sauts» lors des transitions d'état soit associée à l'émission ou à l'absorption de mésons, à la manière des photons émis lorsque l'électron de l'atome d'hydrogène change d'orbitale.[98] Il peut être noté que ce n'est pas la première fois que ce type de justification est mobilisé. En particulier, dans la théorie de Pauli, Bohm déduit les règles de quantification du spin à partir de la symétrie 4π imposée au système (voir la section 6.1.3 page 186). Cependant, dans le cas du modèle des particules, cette explication constate une situation de fait, mais ne légitime pas pour autant l'emploi de la procédure de quantification canonique. Face à cette difficulté, Vigier et Bohm envisagent même la possibilité d'un abandon complet du fondement classique du modèle, le rotateur relativiste, pour conserver uniquement le modèle quantique et l'interpréter dans le cadre d'une théorie des champs.[99]

Ainsi, il n'existe pas d'arguments rationnels en faveur de l'utilisation de la procédure de quantification qui seraient fondés sur les principes de l'ICMQ. Toute explication nécessite de sortir du cadre de la reconstruction rationnelle que nous avons employée jusqu'ici et qui prouve ainsi ses limites. Une explication possible est celle de l'hypothèse *ad hoc*, qui est retenue parce qu'elle permet à la théorie d'avancer. Une autre explication nécessite de revenir plus spécifiquement sur le contexte d'élaboration de la théorie. Au cours de notre étude, nous avons mentionné l'importance des travaux de van Winter. Le groupe reconnait volontiers à la physicienne d'avoir déterminé les fonctions et valeurs propres des opérateurs de rotations complexes. Par contre, il est troublant qu'ils oublient de mentionner une hypothèse physique capitale qu'elle émet à la fin de sa thèse et que l'on retrouve pourtant à l'identique dans le modèle de l'IHP : celle de considérer l'opérateur S'_i comme celui des projections de l'isospin. Le point qui nous intéresse n'est pas tellement de déterminer s'il s'agit d'un cas de plagiat,[100] bien qu'il ne fasse à peu près aucun doute que l'hypothèse de van Winter soit parfaitement connue du groupe IHP. Par contre, en admettant que la thèse de van Winter soutenue le 26 février 1957 ait rapidement circulé à l'IHP, ce qui n'est pas absurde étant donné le statut de de Broglie, il est plausible que le modèle classique ait été en partie construit autour de l'hypothèse physique de van Winter. La physicienne mentionne en particulier les rotateurs de Nakano même si elle n'en adopte pas le modèle, ce qui est un autre argument en faveur de notre hypothèse, sachant que le premier article de Bohm et Vigier est envoyé à *Physical Review* le 23 avril 1957. Dans cette perspective, le processus d'élaboration du modèle des particules s'en retrouverait alors complètement renversé.

98. G. Barbieri, Serge Depaquit et Jean-Pierre Vigier, «Spectroscopy of Baryons and Resonances Considered as Quantized Levels of a Relativistic Rotator», *Nuovo Cimento* XXX, n° 1 (1963).

99. de Broglie et al., « Rotator Model of Elementary Particles Considered as Relativistic Extended Structures in Minkowski Space», 449.

100. Ce serait alors d'un cas assez particulier de plagiat dans lequel la source est citée, mais en omettant son véritable contenu.

La seconde rupture correspond à celle engendrée par l'introduction des mathématiques abstraites, en particulier de la théorie des groupes. L'emploi des groupes mathématiques permet indubitablement à la théorie d'engendrer des progrès, comme en atteste la déduction aisée des tables de particules. Cependant, ces progrès se font au détriment du principe d'intuitivité et de clarté qui prévalait jusque-là. Dès lors, une tension s'exerce entre, d'une part, la praticité des outils mathématiques qu'un pragmatisme encourage à utiliser et, d'autre part, une rigueur et une cohérence épistémologique. Vigier reconnait à demi-mot cette entorse, lui qui était prompt à dénoncer la trop grande abstraction de l'ICMQ dans ses premiers travaux (voir la section 3.1 page 88). Il résout ce dilemme entre pragmatisme et cohérence en s'autorisant l'utilisation des mathématiques abstraites en précisant que « tout modèle unifiant les particules [doit] avoir des aspects intuitifs même si son analyse dynamique devient mathématiquement compliquée et abstraite.»[101] Toutefois, avec le formalisme des groupes, le modèle des particules prend son autonomie vis-à-vis du modèle du rotateur relativiste classique. Par exemple, la formation du second quadruplet des leptons fondamentaux, aux côtés du Yukawon, n'a pas de réelle signification physique puisqu'il revient à intervertir le rôle du centre de masse et de matière. Les représentations irréductibles $D(l^+, l^-)$ auxquelles sont associées les particules sont en passe de devenir la nouvelle ontologie.

Les deux ruptures engendrées par le modèle des particules du groupe IHP le placent indubitablement à part dans la généalogie de l'ICMQ. Pourtant, de Broglie, Bohm et Vigier n'ont de cesse de rappeler dans leurs articles la continuité avec les travaux antérieurs. Cette déclaration parait avant tout de principe tant l'approche et la méthode diffèrent. Il faut toutefois mentionner les brèves tentatives de de Broglie et de Vigier de poser une fonction d'onde qui soit à la fois un état propre du rotateur et solution des équations de la double solution.[102] Chez Vigier en particulier, ces ruptures épistémologiques témoignent d'une meilleure compréhension de la physique par rapport aux travaux de jeunesse qui, par leur naïveté face à un domaine de la physique difficile à appréhender, pouvaient apparaitre dogmatiques et simplistes. Le contact avec les physiciens japonais, en particulier Takabayasi et Yukawa, a été déterminant dans son parcours de physicien. Il tient manifestement Yukawa en admiration comme en témoigne le nom donné au quadruplet élémentaire, le Yukawon. Enfin, ce recours « forcé» à la quantification et aux groupes mathématiques interroge plus largement sur les limites intrinsèques des capacités des représentations classiques et de leur nécessaire abandon, à un certain stade.

101. « We believe that any model for unifying elementary particles should have some intuitive aspects even if its dynamical treatment would become complicated and abstract in mathematical sense.» Katayama, Vigier et Yukawa, « Letters to the Editor : An Approach to the Unified Theory of Elementary Particles», 468.

102. de Broglie et Vigier, « Application de la théorie de la fusion au nouveau modèle étendu de particules élémentaires».

Chapitre 8

Une controverse dans la controverse : le débat quantique au sein du Parti communiste français

Ce huitième et dernier chapitre revient sur la réception de l'ICMQ dans le milieu communiste lié au PCF. Les travaux de Vigier et de ses collaborateurs vont être à l'origine d'une vive polémique dans le contexte particulier de la déstalinisation d'après 1956 qui marque une volonté de rupture dans le Parti, au moins dans les discours, avec le dogmatisme idéologique. L'étude de cette controverse s'appuie pour l'essentiel sur un ensemble d'articles publiés dans les deux revues communistes à destination des intellectuels, *la Pensée* et *la Nouvelle Critique*. Pour ce faire, nous avons systématiquement relevé les articles de ces deux revues abordant la mécanique quantique sur une période qui s'étend de 1939 à 1965 pour *la Pensée* et de 1948 à 1965 pour *la Nouvelle Critique*. Les années 1939 et 1948 correspondent aux dates de création de ces deux revues.

Avant d'aborder la controverse autour de l'ICMQ, nous allons dans un premier temps revenir sur l'interprétation de la mécanique quantique par les communistes avant la guerre, par l'intermédiaire des écrits des plus illustres d'entre eux en cette période, Paul Langevin et son gendre Jacques Solomon. Nous aurons ainsi un point de repère utile afin de mieux comprendre les débats de l'après-guerre. Il sera également pertinent de déterminer comment leurs contributions sont mobilisées. En particulier, Paul Langevin jouit, en tant que physicien et militant, d'une grande autorité et d'un immense prestige au sein du PCF.

L'objet de ce chapitre peut paraitre surprenant puisqu'il ne figure pas dans les prérogatives traditionnelles d'un parti politique de prendre position sur des questions relatives au champ de la philosophie et de l'épistémologie des sciences. En réalité, le

marxisme de Marx et d'Engels ne peut pas être réduit à sa doctrine politique, celle du renversement du capitalisme et l'édification d'une société sans classe. Au contraire, le marxisme, par la dialectique matérialiste, se pose avant tout en théorie générale de la connaissance, celle du rapport entre les idées et la réalité. Le marxisme nait d'une double négation, la première de l'idéalisme allemand, en particulier du courant des « hégéliens de gauche », et, la seconde, de ce que Marx et Engels qualifient de matérialisme « vulgaire », incarné en particulier par Büchner et Vogt, au sens qu'il ne dépasse pas le matérialisme français du XVIIIe siècle en se restreignant à une analyse contemplative. De la dialectique hégelienne, Marx et Engels conservent l'idée que la contradiction est au cœur du mouvement et du matérialisme, celle de l'origine matérielle de toute chose, donc de la pensée humaine.[1] En renversant la dialectique hégelienne par l'affirmation de l'antériorité historique de la matière sur l'esprit, ils suppriment le dualisme entre pensée et matière. La dialectique n'est pas qu'une catégorie abstraite qui permet de penser la réalité, elle est un processus objectif. Le renversement du capitalisme par l'action révolutionnaire consciente de la classe opprimée, le prolétariat, est l'expression de la résolution des contradictions matérielles objectives engendrées par le système capitaliste.

Marx et Engels affichent leur volonté commune d'étendre l'utilisation de leur méthode d'analyse critique au-delà de l'économie et ils vont ainsi s'intéresser à d'autres domaines de la connaissance, comme l'anthropologie, la linguistique[2] et les sciences de la nature. Entre 1878 et 1883, Engels se lance dans la rédaction de la *Dialectique de la Nature*,[3] jamais achevée en raison des responsabilités politiques supplémentaires qu'il doit assurer à la mort de Marx en 1883.[4] Cet intérêt pour les sciences se poursuit avec Lénine et son ouvrage pamphlétaire « Matérialisme et Empiriocriticisme » écrit en 1908, qui s'imposera comme une référence pour les marxistes qui s'inscrivent dans la tradition du bolchévisme. En particulier, la théorie du reflet par laquelle la pensée et l'ensemble de même que ses manifestations créatrices (la politique, la religion, l'art, la littérature ou encore les sciences) sont le reflet d'une réalité sociale extérieure. Dans son analyse critique de l'œuvre de Tolstoï, Lénine considère que « les contradictions dans les idées de Tolstoï, de ce point de vue, sont un véritable miroir des conditions contradictoires dans lesquelles s'est déroulée l'activité historique de la paysannerie au cours de notre révolution. »[5]

1. Pascal Charbonnat, *Histoire des philosophies matérialistes* (Paris : Éditions Syllepse, 2007), 467.
2. Friedrich Engels, *L'origine de la famille, de la propriété privée et de l'État*, trad. Jeanne Stern (1883 ; Paris : Les Éditions Sociales, 1972).
3. Friedrich Engels, *Dialectique de la nature*, Inachevé (1883 ; Paris : Les Éditions Sociales, 1977).
4. Charbonnat, *Histoire des philosophies matérialistes*, 449.
5. Vladimir I. Lénine, «Léon Tolstoï, miroir de la révolution russe», in *Œuvres*, t. 10, Publié dans *Le Prolétariat* n° 35, le 24 septembre 1908 (1908 ; Paris : Éditions sociales, 1962), 224–225 ; À propos de la critique de l'œuvre de Tolstoï par Lénine, voir : Pierre Macherey, *Pour une théorie de la Production Littéraire* (1966 ; Paris : ENS Éditions, 2014), 101.

Il ne nous appartient pas d'entrer dans une analyse approfondie du discours marxiste sur les sciences et nous renvoyons le lecteur à l'abondante littérature sur le sujet.[6] À travers ces quelques lignes, nous voulions avant tout montrer qu'il existe une réelle tradition en épistémologie des sciences marxiste. Elle précède largement l'ère stalinienne et la doctrine des deux sciences, soviétique et capitaliste, qui s'est principalement illustrée à travers la promotion des thèses lyssenkistes en biologie. Dans cette perspective, l'intérêt des physiciens marxistes pour l'interprétation de la mécanique quantique doit d'abord s'envisager au regard de cette tradition, même si l'incarnation particulière du marxisme sous sa forme soviétique et le contexte intellectuel de la Guerre froide vont indubitablement orienter les discussions.

8.1 L'interprétation de la mécanique quantique avant la Seconde Guerre mondiale

Avant la Seconde Guerre mondiale, les contributions des communistes français à l'interprétation de la mécanique quantique se résument essentiellement à celles de deux physiciens, Paul Langevin et Jacques Solomon. Ces deux personnalités jouissent en outre d'un immense prestige au sein du PCF en raison de leur statut d'intellectuels engagés et de résistants. Leurs contributions, en particulier celle de Langevin, continueront d'être prises en référence par les communistes après la guerre, bien que sous une forme altérée. La présente analyse ne prétend pas à l'exhaustivité et s'appuie uniquement sur quelques textes parmi lesquels les questions du déterminisme, du réalisme et, dans le cas de Solomon, des variables cachées sont abordées.

8.1.1 Paul Langevin, le nouveau déterminisme et l'humanisation de la science

Langevin correspond à l'archétype de l'intellectuel engagé de la première moitié du XXe siècle : dreyfusard en 1898, pacifiste en 1914 et surtout marqué par le combat antifasciste depuis les années 1930 et pendant la Seconde Guerre mondiale, notamment par l'intermédiaire des Comité de vigilance des intellectuels antifascistes (CVIA) qu'il crée en 1934 avec l'ethnologue Paul Rivet et le philosophe Alain.[7] En toute rigueur, Langevin ne peut pas être qualifié d'intellectuel communiste puisqu'il ne prend sa carte au Parti qu'en en 1944, seulement deux ans avant sa mort le 19 décembre 1946.

6. Outre l'ouvrage de Charbonnat déjà cité, le lecteur peut se reporter au chapitre 7 de l'ouvrage : Simon Gouz, *J.B.S. Haldane, la science et le marxisme : La vision du monde d'un biologiste* (Paris : Éditions Matériologiques, 2012), 421–486.

7. Isabelle Gouarné, *L'introduction du marxisme en France : Philosoviétisme et sciences humaines 1920–1939* (Rennes : Presses Universitaires de Rennes, 2013), 122.

Il est ce qu'on appelle alors un « compagnon de route », un intellectuel de gauche qui soutient le projet de société soviétique et pour lequel le parti donne une reconnaissance symbolique.[8] Toutefois, bien que non membre, sa sympathie envers le PCF et le matérialisme dialectique dans les années 1930 ne fait aucun doute. Membre du comité scientifique du Centre de la Russie neuve, c'est avec le soutien du PCF qu'il devient président du comité de rédaction de la nouvelle revue *la Pensée* en 1939, entouré entre autres de Marcel Prenant, Georges Cogniot, Paul Labérenne, Lucien Febvre, Henri Wallon et Marcel Cohen.[9]

Langevin n'a pas contribué en tant que physicien au développement de la mécanique quantique, ses domaines de prédilection étant le magnétisme et la relativité restreinte. Il s'est néanmoins vivement intéressé à la théorie des quanta et fait partie, dans les années 1920, des rares supporters de la théorie en France avec les Joliot-Curie, Jean Perrin et Louis de Broglie. Il encadre notamment la thèse de doctorat de ce dernier dont il est l'un des principaux vecteurs de diffusion à l'étranger (voir la section 1.1.3 page 23). Il rédige en outre un nombre assez conséquent de textes de « vulgarisation » dédiés à l'interprétation de la mécanique quantique. La caractérisation de la pensée de Langevin en rapport à l'interprétation de la mécanique quantique est sujette à un débat historiographique, afin de savoir de qui il est le plus proche, d'Einstein ou de Bohr.

L'image d'un Langevin proche des idées Einstein est celle traditionnellement diffusée par les milieux communistes d'après-guerre et majoritairement reprise par les philosophes marxistes. C'est l'option défendue par Eftichios Bitsakis qui compare les positions des trois physiciens selon six critères (réalisme, déterminisme, complétude, localité, matérialisme, et matérialisme dialectique) rassemblés dans un tableau reproduit en 8.1.

Question	Einstein	Langevin	Bohr
Réalisme	oui	oui	non (pas toujours)
Déterminisme	oui	oui	non
Complétude	non	non	oui
Localité	oui	oui	non
Matérialisme	oui (?)	oui	non
Matérialisme Dialectique	?	oui	non

Tab. 8.1: Eftichios Bitsakis : Comparaison des interprétations de la mécanique quantique par Einstein, Bohr, et Langevin.[10]

En préalable à la discussion des différentes réponses à ces questions que Bitsakis

8. Gouarné, *L'introduction du marxisme en France*, 100–101.
9. Gouarné, *L'introduction du marxisme en France*, 144–145 ; Pour une vue d'ensemble de la carrière scientifique et militante de Paul Langevin, voir : Bensaude-Vincent, *Langevin, 1872–1946*.

attribue à Langevin, nous allons passer en revue celles de Bohr. Bitsakis oppose le positivisme de Bohr au réalisme d'Einstein et de Langevin. Or, ce point de vue est contestable. Don Howard met en doute cette lecture fréquente d'un Bohr positiviste qui nait dans le milieu des années 1950, en même temps que l'« interprétation de Copenhague», sous la houlette de Heisenberg.[11] Howard montre qu'en réalité Bohr ne statue pas sur le réalisme, en pour ou en contre. L'objet de la complémentarité concerne le langage et la manière de communiquer les résultats des expériences sans ambigüité et ne se prononce pas sur la question du réalisme (voir la section 1.1.5 page 32). À propos de la dialectique, il faut noter que Fock et Rosenfeld, qui se réclament tous les deux de Bohr, ont une lecture marxiste de la complémentarité qu'ils intègrent dans leur vision du matérialisme dialectique. D'ailleurs, en 1961, même Vigier reconnait que « Bohr utilise consciemment une démarche dialectique. Il dit que la matière a des aspects contradictoires qui s'excluent mutuellement, elle se présente tantôt comme onde, tantôt comme corpuscules, mais jamais les deux à la fois.»[12]

Concernant Langevin, il existe un consensus large pour reconnaitre que l'évolution de sa pensée puise dans une tradition réaliste et rationaliste pour intégrer progressivement, à partir des années 1930, le matérialisme dialectique. Langevin critique sans détour les « philosophes idéalistes, ainsi que les physiciens qui partagent leurs conceptions, comme Eddington, Jeans, Jordan, Dirac et d'autres». On remarque par ailleurs que Bohr n'est pas mentionné parmi les physiciens idéalistes, alors que Langevin le cite plus loin dans l'article pour son rôle dans la formulation de la mécanique quantique. Cependant, les autres réponses aux questions posées par Bitsakis sont sujettes à débat.

La préoccupation majeure de Langevin concerne le déterminisme, ce qui n'est pas étonnant puisque c'est autour de ce thème que se sont cristallisés les débats quantiques dans les années 1930. Langevin demeure un fervent défenseur du déterminisme contre ceux qui voudraient l'enterrer trop hâtivement. Langevin argue que la mécanique quantique a signé la faillite du déterminisme laplacien, mais pas du déterminisme en général. Il qualifie ce nouveau déterminisme de statistique et il tire d'ailleurs d'importantes conséquences politiques sur ce qu'il dénomme l'« humanisation de la science» : la nouvelle physique est contraire au fatalisme et prouve que le futur n'est pas écrit à l'avance, que l'action des hommes peut changer le cours de l'histoire. Cette thèse entre évidemment en résonance avec la période des années 1930 de montée du fascisme et du nazisme en Europe. Bitsakis en déduit que Langevin fait partie de l'école déterministe et donc que sa position est identique à celle d'Einstein.[13] Freire Jr. note au contraire que le déterminisme statistique ne peut se confondre avec celui d'Einstein qui n'est, pour sa part, pas fondamentalement différent du déterminisme classique. Sur

11. Howard, « Who Invented the "Copenhagen Interpretation" ? A Study in Mythology».
12. Vigier, « Théorie des niveaux dialectique de la nature», 40.
13. Eftichios Bitsakis, *La nature dans la pensée dialectique* (Paris : L'Harmattan, 2001), 316–320.

cette question, Langevin est donc plus proche de Bohr que d'Einstein.[14]

Pour autant, les interprétations de Bohr et de Langevin divergent sur le sens qu'ils donnent aux inégalités de Heisenberg, comme en atteste son article de 1939 paru dans le premier numéro de *la Pensée*. Dans celui-ci, Langevin illustre ces relations par deux expériences de pensées. La première part du comportement ondulatoire de la matière :

> Supposons que nous ayons affaire à un faisceau d'électrons dont la vitesse est bien définie en grandeur et en direction, qui sera horizontale par exemple. Dans le langage de la mécanique ondulatoire, cela veut dire qu'une onde électronique plane, de fréquence et de longueur d'onde bien définies, se propage dans cette direction. Un électron appartenant au faisceau pourra se trouver dans n'importe quel point de l'espace occupé par celle-ci. Considérons sa coordonnée q verticale : la position de notre électron est indéterminée, donc Δq est très grand. Si nous voulons augmenter la précision sur la position dans le sens vertical, nous prendrons deux lames et nous les rapprocherons de manière à réaliser une fente horizontale perpendiculaire à la direction de propagation. Plus cette fente sera étroite et plus nous aurons de précision au sujet de la position de l'électron dans la direction verticale. L'erreur sur la position Δq sera en effet égale à la largeur de la fente.
>
> Mais si nous obligeons les électrons et l'onde qui leur est associée à passer par une fente étroite, l'onde va être diffractée (tout comme une onde lumineuse). Au-delà de la fente, les électrons auront des vitesses dans des directions différentes (alors qu'elles étaient toutes parallèles avant la fente). L'ordre de grandeur de la déviation θ correspondant à cette diffraction est, d'après les lois mêmes de la diffraction, donné par le rapport de la longueur d'onde λ de l'onde électronique, à la largeur de la fente Δq; la diffraction est d'autant plus importante que la longueur d'onde est plus grande et la fente plus étroite. Cela signifie que la quantité de mouvement, horizontale avant le passage à travers la fente, va prendre après ce passage une direction différente en général. Dans la direction verticale, l'incertitude sur la quantité de mouvement sera égale à la composante dans cette direction de la quantité de mouvement déviée de l'angle θ. Comme la quantité de mouvement est d'après la relation fondamentale de L. de Broglie $\frac{h}{\lambda}$ l'incertitude Δp sera :
>
> $$\Delta p = \frac{h}{\lambda} \times \theta = \frac{h}{\lambda} \times \frac{\lambda}{\Delta q}, \text{d'où} \;\; \Delta p \cdot \Delta q = h \tag{8.1}$$
>
> C'est bien là la relation d'incertitude d'Heisenberg obtenue comme conséquence du fait expérimental de la diffraction des ondes électroniques.[15]

14. Freire Jr., «L'interprétation de la mécanique quantique selon Paul Langevin», 119–123 ; Freire Jr., « Quatum Controversy and Marxism», 140–142 ; Voir aussi : Olival Freire Jr., «La physique quantique et l'humanisation de la science», Textes préparés à l'occasion du Colloque Paul Langevin, qui s'est tenu les 12 et 13 juin 1997 à Paris, *Épistémologiques* II (1 2002) : 111-126.
15. Paul Langevin, «La physique moderne et le déterminisme», *La Pensée* 1 (1939) : 9–10.

Dans la seconde expérience de pensée, Langevin reprend l'expérience du microscope à rayons γ de Heisenberg qui, cette fois-ci, considère la matière d'un point de vue corpusculaire :

> On retrouve encore cette relation lorsqu'on cherche à préciser au maximum la position d'un électron au moyen d'un appareil analogue à un microscope : c'est le célèbre microscope de Heisenberg. Nous envoyons de la lumière sur l'électron : l'électron la renvoie dans la direction de l'observateur, et le point où se forme la tache lumineuse sur l'oculaire du microscope nous indique la position de l'électron au moment considéré. Plus la tache sera petite, mieux sera connue la position. Or les dimensions de cette tache lumineuse sont, toujours en raison des phénomènes de diffraction, fixées par la longueur d'onde de la lumière utilisée. Si l'on veut avoir une grande précision sur la position de l'électron, il faut réduire au maximum les dimensions de la tache et, pour cela, utiliser une lumière de longueur d'onde la plus faible possible. Mais alors la loi des quanta nous indique que l'énergie de cette radiation sera très grande : lorsqu'elle va rencontrer notre électron, celui-ci va subir un recul très important, d'autant plus important que la longueur d'onde sera plus petite : si nous voulons connaître très exactement la position de l'électron, sa vitesse, par suite du recul, sera très mal connue. Inversement, si nous voulons connaître très exactement la vitesse de l'électron, il suffira de l'éclairer avec de la lumière de très grande longueur d'onde et de mesurer les modifications que l'électron lui fait subir (effet Doppler) ; mais la tache de diffraction est alors énorme, et la position de l'électron est très mal définie. On a toujours, comme précédemment, $\Delta p \cdot \Delta q = h$.[16]

Dans ces deux expériences de pensée, Langevin interprète les relations d'indétermination comme une conséquence expérimentale. Dans la première, l'indétermination sur la quantité de mouvement se manifeste par la diffraction d'un faisceau d'électrons, représenté par une onde, lors de son passage à travers une fente étroite dont la largeur détermine la précision de la mesure. Dans la seconde, l'éclairage de cet électron sous une lumière, dont la longueur d'onde doit être d'autant plus faible que la mesure de la position se doit d'être précise, lui transmet de l'énergie qui va alors le faire dévier de sa trajectoire initiale par diffusion Compton. Langevin conclut de cette impossibilité de mesurer simultanément la position et la vitesse comme la preuve de la faillite du mécanisme, mais pas pour autant de celle du déterminisme en général :

> On est parti de ce résultat pour proclamer la faillite du déterminisme. On a affirmé que le mouvement des corpuscules de toute nature n'est pas déterminé, puisqu'il serait impossible de définir expérimentalement au même instant la position et la vitesse d'un corpuscule quelconque. C'était justement dire qu'il n'était qu'un déterminisme possible, celui de Laplace, et que, du moment que celui-ci ne se vérifiait pas dans le nouveau domaine étudié, il n'y avait pas de déterminisme du tout. Nous avons vu pourtant

16. Ibid., 10.

> que déjà l'aspect ondulatoire de la lumière nous met en présence d'un déterminisme différent de celui de Laplace : il suffit de rappeler les tentatives nombreuses de la fin du siècle dernier pour donner une « explication mécanique » de la théorie de Maxwell.[17]

Cette présentation des relations de Heisenberg par Langevin amène à deux commentaires.

Premièrement, les relations sont interprétées en tant que limites de la connaissance possible des propriétés du système, mais pas comme celles résultant d'une indétermination intrinsèque. Dans son explication de l'expérience du microscope, l'électron possède en effet implicitement une position et une quantité de mouvement avant la mesure. Elles ne sont toutefois pas mesurables simultanément avec une précision arbitrairement élevée, en raison de l'interaction entre l'électron et le rayonnement incident. Cette interprétation épistémologique des relations d'indétermination est à rapprocher de celle originellement proposée par Heisenberg en 1927, mais critiquée par Bohr. Elle ne s'y confond cependant pas totalement puisque Heisenberg explique l'imprécision comme une conséquence de l'échange discontinu d'énergie qui n'apparait pas dans l'explication proposée par Langevin (voir la section 1.1.5 page 32).

Deuxièmement, Langevin associe systématiquement le comportement ondulatoire de la matière à celui d'ensembles statistiques et non à l'électron individuel. Dans la première expérience, il mentionne un « faisceau d'électrons ». Il est encore plus explicite sur ce point en amont dans l'article :

> On notera par ailleurs que, dans la conception corpusculaire comme dans la conception ondulatoire, on se trouve en présence de types assez différents de déterminisme. C'est ainsi que le déterminisme de l'optique ondulatoire, fixant dans son ensemble l'aspect de la figure d'interférences ou de diffraction, est fort différent du déterminisme de l'optique géométrique qui fixe le mouvement de chaque corpuscule lumineux pris isolément (rayon lumineux).[18]

Une idée qu'il développe la page suivante :

> L'onde, dans le cas de la lumière comme dans celui de la matière, détermine les probabilités de présence des corpuscules[...], la manière dont les corpuscules se distribuent sur une plaque photographique entre les différentes franges d'interférence ou de diffraction.[19]

Ainsi, Langevin ne semble pas envisager le comportement ondulatoire pour les objets individuels, ce qui constitue une forte restriction de la dualité onde-corpuscule.

17. Langevin, « La physique moderne et le déterminisme », 10.
18. Ibid., 7.
19. Ibid., 8.

En admettant implicitement que les systèmes quantiques possèdent des prospérités intrinsèques bien définies, Langevin laisse grande ouverte la possibilité d'incomplétude de la théorie, qui irait dans le sens de la réponse négative de Langevin à la question de la complétude attribuée par Bitsakis. Toutefois, et Bitsakis le reconnait, Langevinne tire jamais explicitement cette conclusion et n'a, par ailleurs, jamais traité la question de front. Bitsakis argumente sa réponse à partir d'une autre citation de Langevin, extraite du même article, dans laquelle le physicien conjecture qu'avec « les nouvelles particules que cette science a permis de découvrir – neutrons, mésotons, neutrinos – aurons-nous autant de surprises dans ce deuxième sous-sol, par rapport au premier, que nous en avons eu dans celui-ci par rapport à notre expérience macroscopique.»[20] Bitsakis en déduit que la pensée de Langevin se situe dans la tradition de « l'École réaliste» d'Einstein, Bohm et Vigier. En reprenant l'analogie des étages, le niveau subquantique introduit par Bohm et Vigier ou l'éther de Dirac constitueraient selon Bitsakis des candidats potentiels pour remplir ce troisième sous-sol. Cette extrapolation opérée par Bitsakis nous parait cependant abusive. En effet, Langevin affirme juste que la théorie quantique n'est pas la dernière étape de la connaissance physique et qu'il reste encore beaucoup à explorer. Cette position, si elle est évidemment partagée par les partisans du programme causal, demeure cependant générale et ne permet pas de préfigurer sa position sur la complétude de la théorie actuelle. En effet, il faut différencier le fait d'admettre qu'un jour ou l'autre la mécanique quantique sera supplantée par une autre théorie de la question de la complétude. La déclaration de Langevin n'interdit pas de considérer la mécanique quantique comme une théorie cohérente, parfaitement définie par ses axiomes, et donc complète.

D'après cette courte étude, nous concluons que la pensée de Langevin ne peut pas être assimilée à celle d'Einstein comme l'avance Bitsakis, pour les raisons évoquées par Freire à propos de l'indéterminisme statistique. Bitsakis a cependant raison de différencier sa pensée de celle de Bohr. Langevin propose une interprétation originale de la mécanique quantique, profondément, réaliste, ou matérialiste, mais qui, dans son dépassement du déterminisme laplacien, diffère de celui d'Einstein ou de de Broglie d'avant son abandon de la double solution. La pensée de Langevin est symptomatique des tensions inévitables qui se créent pour qui souhaite interpréter la mécanique quantique de manière réaliste tout maintenant tel quel son édifice mathématique. Malgré les déclarations de principe sur la fin du mécanisme, il n'est pas toujours aisé, *dans la pratique*, de s'affranchir de tout mécanisme dans une explication qui souhaite préserver le déterminisme. Ce genre de tensions se retrouve chez Solomon, pourtant ardent défenseur de la complémentarité bohrienne.

20. Ibid., 11–12.

8.1.2 Jacques Solomon, l'ambassadeur de la complémentarité en France

Dans la période de l'entre-deux-guerres, Jacques Solomon[21] est le second physicien communiste qui a contribué au débat quantique après Langevin, dont il est le gendre par son mariage avec sa fille Hélène. Solomon est promis à une brillante carrière de physicien, malheureusement terminée précocement par son exécution en 1942. Membre du PCF depuis 1934, il s'engage dans la Résistance dans la France occupée après l'armistice de juin 1940. Il est arrêté par les Brigades spéciales le 1er mars 1942, interné, puis livré aux forces allemandes qui le fusillent au mont Valérien le 23 mai, en compagnie de son camarade et ami Georges Politzer.

Solomon n'est pas destiné à une carrière de physicien. Il bifurque en effet vers la physique théorique après des études de médecine, alors qu'il est encore externe des hôpitaux de Paris. Il est, avec Alexandru Proca, Louis Goldstein, Jean-Louis Destouches et Francis Perrin, de la nouvelle génération de physiciens français qui vont participer au renouvellement de la discipline dans les années 1930, tant par la nature de ses travaux que par une bien meilleure insertion dans la communauté internationale que ne l'étaient leurs prédécesseurs, notamment de Broglie. Solomon profite en effet de la prestigieuse bourse de la Fondation Rockefeller qui lui offre une grande liberté dans ses recherches. Il met à profit cette occasion pour visiter, entre autres, Bohr à Copenhague ainsi que Pauli à Zurich.

Solomon se spécialise vers la jeune théorie quantique des champs de Heisenberg et Pauli, qui devient son sujet de thèse de doctorat qu'il prépare entre 1929 et 1931 sous la direction de Léon Brillouin. La théorie quantique des champs est la raison de sa collaboration avec Bohr et Rosenfeld à Copenhague. Solomon est rapidement rapidement en prise avec le problème des infinis (voir la section 3.1 page 88) qu'il tente de surmonter avec Rosenfeld.[22] Leur solution consiste à faire un choix alternatif d'hamiltonien. Cependant, leur hamiltonien ne permet pas de traiter les interactions entre le champ et la matière, à l'origine des principales difficultés de la théorie quantique des champs.[23] Solomon s'intéresse également aux conditions de mesurabilité des champs, notamment électromagnétiques, après leur quantification. Il prend alors position en faveur de Bohr et de Rosenfeld dans la controverse qui les oppose à Landau et Peierls sur la mesurabilité des champs relativistes. Ces derniers prédisent qu'à haute énergie

21. Sauf précision, les éléments sur la carrière de Solomon sont extraits de : Martha Cecilia Bustamante, «Jacques Solomon (1908–1942) : profil d'un physicien théoricien dans la France des années trente», *Revue d'histoire des sciences* 50, n° 1 (1997) : 49-88.

22. Jacques Solomon et Léon Rosenfeld, «Sur la théorie quantique du rayonnement», *JPR* 2 (1931) : 139-147 ; Jacques Solomon et Léon Rosenfeld, «Zur Theorie der Hohlraumstrahlung», *Die Naturwissenschaften* 19, n° 18 (1931) : 376.

23. Vila Valls, « Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960)», 133-134.

les relations de Heisenberg cesseront d'être valables, ce qui mènerait à l'effondrement du formalisme de la mécanique quantique, et ils plaident en conséquence pour une refonte totale de la théorie.[24] Un autre centre d'intérêt de Solomon concerne la quantification de la gravitation, raison de sa collaboration avec Pauli pendant un an à Zurich en 1933 et avec lequel il cherche à intégrer la gravitation au sein de l'équation de Dirac. Ses recherches sur la gravitation quantique le font également visiter à plusieurs reprises la Russie où il collabore avec Frenkel. Enfin, Solomon s'intéresse entre 1934 et 1939 à la physique du noyau et à l'étude des rayons cosmiques.

Concernant le sujet spécifique de l'interprétation de la mécanique quantique, Solomon est l'un des principaux représentants de la complémentarité bohrienne en France. Il est profondément marqué par ses échanges avec Rosenfeld à Paris, qu'il rencontre lorsque celui-ci poursuit son postdoctorat et avec lequel il se lie d'amitié. Ils assistent en particulier tous les deux au cours de Langevin au Collège de France. Par l'intermédiaire de Rosenfeld, il entre en contact avec Bohr. Solomon accueille avec un grand enthousiasme et sans retenue la mécanique quantique et les bouleversements conceptuels qu'elle exige. Loin d'adopter une attitude conservatrice, il n'hésite pas à envisager des hypothèses les plus audacieuses. À propos des difficultés rencontrées par la théorie dans son passage à la relativité, il envisage sereinement la possibilité d'un abandon de la conservation de l'énergie :

> La mécanique quantique relativiste – qui n'existe pas encore – semble devoir nécessiter des renoncements encore plus profonds à nos concepts les plus habituels (tels que la conservation de l'énergie par exemple).[25]

La preuve d'impossibilité d'existence de paramètres cachés

La plus importante contribution de Solomon au débat quantique est indéniablement sa tentative de démonstration de l'impossibilité de compléter la théorie par des variables cachées, formulée en 1932 et publiée en janvier 1933, et dont la citation précédente est extraite. Solomon établit sa preuve en totale indépendance de celle de von Neumann de 1932, qu'il découvre *in extremis* alors que son article est déjà soumis au *JPR*. Solomon, qui parle allemand, a eu le temps d'étudier la preuve de von Neumann.

24. Concernant cette controverse, voir : Anja Skaar Jacobsen, «Crisis, Measurement Problems and Controversy in Early Quantum Electrodynamics : The Failed Appropriation of Epistemology in the Second Quantum Generation», in *Weimar Culture and Quantum Mechanics : Selected Papers by Paul Forman and Contemporary Perspectives on the Forman Thesis*, sous la dir. de Cathryn Carson, Alexei Kojevnikov et Helmuth Trischler (Londres : Imprerial College Press, 2011), 375-397 ; Olivier Darrigol, «Cohérence et complétude de la mécanique quantique : l'exemple de "Bohr-Rosenfeld"», *Revue d'histoire des sciences* 44, nº 2 (1991) : 137-179 ; Thiago Hartz Maia, «As heterodoxias quânticas e o olhar do historiador : uma história dos usos dos argumentos de Niels Bohr acerca da medição de campos quânticos (1930-1970)» (thèse de doct., Universidade Federal da Bahia, 2013).

25. Jacques Solomon, «Sur l'indéterminisme de la mécanique quantique», *JPR* 4, nº 1 (1933) : 34.

Il précise en note de bas de page que sa propre démonstration conserve tout son intérêt en raison de sa plus grande simplicité en comparaison de celle de von Neumann, qui s'appuie quant à elle sur « le formalisme de l'espace de Hilbert qui peut paraître à certains assez éloigné du réel physique ».[26]

La démonstration de Solomon est tombée dans l'oubli jusqu'à être exhumée par Jammer en 1974.[27] Jammer note que la démonstration soulève un certain nombre de questions et mériterait ainsi d'être examinée plus en détail. En effet, elle contient nécessairement une ou plusieurs erreurs puisque les théories à variables cachées consistantes sont non seulement possibles, mais existent. L'appel de Jammer n'est entendu qu'en 2007, par Andrew Whitaker, de la Queen's University de Belfast, qui analyse minutieusement l'article pour en extraire les approximations et y déceler une erreur fatale.[28] Dans la suite de cette section, nous proposons de revenir sur l'article de Solomon.

En guise d'analyse préliminaire, Solomon précise quelques propriétés de la mécanique quantique qui lui seront utiles par la suite. Il commence par définir la position et la vitesse d'une particule comme des fonctions du temps t :

$$x = f(t); \quad v = g(t) \tag{8.2}$$

Il rappelle ensuite que la mécanique quantique renseigne uniquement des probabilités d'obtenir une valeur particulière de la position et de la vitesse lors d'une mesure. Pour la position, la probabilité que x prenne une valeur comprise entre x et $x + \mathrm{d}x$ est :

$$\varpi \mathrm{d}x = \psi^\star(x,t)\psi(x,t)\mathrm{d}x \tag{8.3}$$

Identiquement, la probabilité que la vitesse prenne une valeur comprise entre v et $v + \mathrm{d}v$ est :

$$\varpi_1 \mathrm{d}v = \varphi^\star(v,t)\varphi(v,t)\mathrm{d}v \tag{8.4}$$

Les fonctions ϖ et ϖ_1 sont les densités de probabilités, respectivement associées aux observables x et v. Elles ne sont pas indépendantes l'une de l'autre puisque les fonctions d'onde $\psi(x,t)$ et $\varphi(v,t)$ sont transformées de Fourier l'une de l'autre :

$$\varphi(v,t) = \sqrt{\frac{m}{h}} \int \mathrm{e}^{\frac{2\pi i}{h} mvx}\, \psi(x,t)\mathrm{d}x; \quad \psi(x,t) = \sqrt{\frac{m}{h}} \int \mathrm{e}^{-\frac{2\pi i}{h} mvx}\, \varphi(v,t)\mathrm{d}v \tag{8.5}$$

26. Solomon, « Sur l'indéterminisme de la mécanique quantique », 34.
27. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, 271–272 ; D'après Cécile Colin, Paulette Février la mentionne en 1952, mais l'auteur ne précise pas sa source : Cécile Colin, « Jacques Solomon et l'interprétation de la théorie quantique », *Revue d'histoire des sciences* 63, n° 1 (2010) : 228.
28. Andrew Whitaker, « Solomon's Argument on Hidden Variables in Quantum Theory », *Found. Phys.* 37, n° 6 (2007) : 989-997.

Les densités de probabilité ϖ et ϖ_1 sont unies par la relation d'indétermination de Heisenberg $m\Delta v \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$. De manière rhétorique, Solomon demande alors si l'indétermination sur v lorsque l'on connait x ne serait pas la conséquence que :

> notre représentation de la marche causale des phénomènes est incomplète ; en d'autres termes qu'un (ou plusieurs) paramètre supplémentaire soit nécessaire pour qu'une description causale complète d'un phénomène soit possible ? C'est à ces paramètres (de nature inconnue pour le moment) que nous donnerons le nom de *paramètres cachés* (verbogene Parameter).[29]

L'objectif de l'article est bien pour Solomon de répondre par la négative à cette question. Sa démonstration adopte la forme de la preuve par l'absurde dans laquelle il souhaite montrer que l'introduction de paramètres cachés conduit nécessairement à une situation physique impossible, car contraire aux lois de la mécanique quantique qu'il considère donc comme acquises. Suivant l'hypothèse qu'il existe effectivement des paramètres cachés, Solomon introduit alors un paramètre u de sorte que sa connaissance en un temps t permette effectivement de définir les valeurs de la position et de la vitesse simultanément. Pour ce faire, il suffit de rendre la position x et la vitesse v explicitement dépendantes du paramètre u :

$$x = f(t, u); \quad v = g(t, u) \tag{8.6}$$

À ce stade, Solomon formule une remarque intéressante. Comme le paramètre u est, en raison de sa qualité de paramètre caché, inconnu, il existe à chaque instant t une infinité de valeurs possibles de x et de v. La connaissance que possède un observateur de ces valeurs est, selon les lois de la mécanique quantique, statistique et donc sujette aux relations de Heisenberg entre les écarts types. Alors, Solomon remarque qu'en raison de ces relations qu'il dénomme « principe d'indétermination » – ce qui n'est pas anodin, nous allons y revenir – rien ne permet de garantir avec certitude que, lors d'une mesure simultanée de la position et de la vitesse, la valeur de u soit commune aux deux observables. Solomon retourne ainsi le raisonnement : à cause des relations de Heisenberg, les paramètres cachés le demeureront irrémédiablement quand bien même ils ne seraient pas interdits par la théorie. À noter que cette dérivation des relations de Heisenberg à partir des transformations de Fourier situe clairement Solomon du côté de Bohr. L'emploi de l'expression « principe d'indétermination », plutôt qu'incertitude, suggère une interprétation ontologique de ces relations. Sur ce point, il existe donc une différence notable entre Solomon et Langevin, qui laissait pour sa part la dimension ontologique en suspens. Cependant, comme nous allons le constater un peu plus loin, l'interprétation des relations d'indétermination par Solomon n'est pas en réalité si évidente et vierge de toute ambigüité.

29. Solomon, « Sur l'indéterminisme de la mécanique quantique », 35.

Après avoir introduit un paramètre caché, Solomon considère une autre fonction $F(t,u)$ dont la valeur à un instant t fixé dépend uniquement du paramètre caché u. La valeur moyenne de cette fonction est donnée par :

$$\bar{F}(t) = UF(t,u) \tag{8.7}$$

où U est un opérateur qui permet de moyenner une fonction quelconque. Hormis une condition sur la linéarité de U afin que la moyenne de la somme des fonctions $F+G$ soit égale à $\bar{F}+\bar{G}$, Solomon ne précise pas la forme spécifique de U afin de demeurer dans le cas général.

Comme il est habituel de le faire en physique, Solomon réécrit la valeur moyenne de F sous une forme intégrale :

$$\bar{F}(t) = \int F(t,u)G(u)\mathrm{d}u \tag{8.8}$$

La fonction $G(u)$ est le noyau de l'opérateur U. Physiquement, elle correspond à la densité des états quantiques dans l'espace des u. Par un changement de variables qui n'est pas explicité, mais qui correspond à $\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}u} = G(u)$, Solomon écrit :

$$\bar{F}(t) = \int F(t,w)\mathrm{d}w \tag{8.9}$$

À partir de la formule précédente, Solomon en déduit la valeur moyenne de la variable $x(t,u)$ à la puissance n :

$$\bar{x}^n = \int f^n(t,w)\mathrm{d}w \tag{8.10}$$

Or, note Solomon, cette valeur moyenne $\bar{x^n}$ est également définie en mécanique quantique par :

$$\bar{x}^n = \int x^n \varpi(x,t)\mathrm{d}x \tag{8.11}$$

Par un changement de variables $x \to w$, x étant une variable muette, Solomon réécrit cette dernière expression :

$$\bar{x}^n = \int w^n \varpi(w,t)\mathrm{d}w \tag{8.12}$$

Comme les équations (8.10) et (8.12) doivent être égales quel que soit t, Solomon en déduit l'égalité :

$$f^n(t,w) = w^n \varpi(w,t) \tag{8.13}$$

Qui doit être vérifiée quel que soit n. En fixant $n = 0$, il vient :

$$\varpi(w, t) = 1 \tag{8.14}$$

Or, Solomon remarque que cette dernière relation est incompatible avec la mécanique quantique puisqu'elle « n'a évidemment lieu que dans des conditions très spéciales». Cette condition, qu'il ne précise pas, est que le système avant la mesure doit nécessairement se trouver dans un état propre de la base engendrée par les x^n, ce qui constitue à l'évidence une condition très restrictive.[30] Solomon conclut à l'impossibilité de compléter la mécanique quantique par des paramètres cachés qui restaureraient la causalité.

Whitaker relève cependant une faille dans la démonstration de Solomon. Lorsque Solomon égalise les équations (8.10) et (8.12) après son changement de variables, il présuppose que les intégrales sont égales, mais également les intégrandes (équation (8.13)). Concrètement, cela signifie que les domaines d'intégration dans l'espace des x et des w sont les mêmes, qui, sans précision supplémentaire de Solomon, doivent s'étendre de $-\infty$ à $+\infty$ (il intègre sur tout l'espace). Whitaker montre qu'il est aisé de trouver un contre-exemple où ce n'est pas le cas, en l'occurrence que $w \in [0; 1]$. La conclusion de Solomon que l'introduction de paramètres cachés restreint la densité de probabilité à la valeur $\varpi(w, t) = 1$ est donc erronée.[31]

La volonté de Solomon de démontrer l'impossibilité de compléter la mécanique quantique à l'aide de variables cachées est étroitement connectée à son rejet du déterminisme classique. Il considère l'option des variables cachées non comme la marque d'un sursaut rationaliste, mais, au contraire, comme celle d'une attitude conservatrice qui, de surcroit, possède un avantage épistémologique, sinon faible, inexistant :

> En somme, nous remplaçons le système parfaitement logique de la mécanique quantique, mais d'où la causalité au sens classique est exclue, par un autre système parfaitement déterministe, mais comportant l'hypothèse d'éléments naturels inconnus. Irrationnel pour irrationnel, l'avantage est assez médiocre. En réalité, tout l'intérêt de cette théorie des paramètres cachés est qu'elle permet de formuler l'espoir que ces paramètres ne seront pas toujours cachés et que la découverte des éléments de la nature auxquels ils correspondent permettra de restituer la physique dans son cadre déterministe d'antan.[32]

Toutefois, à l'image de Langevin, cette critique du déterminisme classique n'est pas synonyme chez Solomon d'un rejet du déterminisme en général.

30. Ce serait le cas si une mesure antérieure est réalisée, préparant ainsi le système dans un de ses états propres.
31. Whitaker, « Solomon's Argument on Hidden Variables in Quantum Theory».
32. Solomon, « Sur l'indéterminisme de la mécanique quantique», 36.

En défense du rationalisme

Solomon s'emploie avec énergie à défendre les principes du rationalisme et du réalisme contre les thèses idéalistes en vogue chez de nombreux physiciens. Cette défense ne pouvait trouver un meilleur accueil que dans les colonnes de la jeune revue *la Pensée* fondée par Langevin. Solomon y publie deux articles sur la question dans les deux premiers numéros, qui sont les seuls parus avant-guerre, jusqu'à la reparution de la revue à l'automne 1944.[33]

Dans son premier article, Solomon critique fermement l'attitude de certains physiciens qui, sous prétexte des limites au mécanisme imposées par les quanta, en reviennent à ce qu'il considère être un retour à des conceptions préclassiques :

> Mais la Physique est sans doute aussi la science où les doctrines philosophiques les plus rétrogrades ont cherché à trouver de nouvelles armes pour leur lutte contre ce rationalisme qui est justement à l'origine d'aussi magnifiques conquêtes. Parce que les physiciens sont amenés par le contact des faits à reconnaître l'insuffisance de certaines conceptions mécanistes, on cherche non pas à découvrir les formes nouvelles de mouvement dont le mécanisme n'est qu'un cas particulier, mais à revenir en arrière, en deçà de l'époque du mécanisme.[34]

Solomon vise spécifiquement les interprétations subjectivistes de la fonction d'onde des physiciens qui, à l'instar de Jordan, déclarent la fin du matérialisme. Solomon raille le « libre arbitre » attribué par le physicien allemand à la nature dans son ouvrage de 1936 *Die Physik des 20. Jahrhunderts*.[35] Solomon qualifie d'« animisme mécaniste » l'extrapolation de l'indéterminisme quantique à la biologie et à la psychologie humaine opérée par le physicien. Solomon convie même Jordan à changer de métier, car « quand on lit ces lignes d'un homme qui fait métier de physicien, on est tenté de se demander s'il croit sérieusement ce qu'il écrit. » Si Jordan est attaqué avec tant de véhémence par Solomon et Langevin, c'est en grande partie à cause de ses choix politiques. Solomon rappelle le soutien actif de Jordan au national-socialisme allemand et établit d'ailleurs un lien direct entre son adhésion au projet nazi et ses positions antiréalistes dans le domaine des quanta, car « ce n'est pas par hasard que P. Jordan est connu comme un national-socialiste fieffé. »[36] Dans les années 1930, la lutte contre le fascisme et le nazisme est au cœur de l'activité militante des communistes et de la gauche de manière générale,[37] et Langevin et Solomon sont particulièrement engagés

33. Jacques Solomon, « Du "radium artificiel" à la conception de l'atome », *La Pensée* 1 (1939) : 92-97 ; Jacques Solomon, « Les ondes de probabilité », *La Pensée* 2 (1939) : 87-90.
34. Solomon, « Du "radium artificiel" à la conception de l'atome », 95.
35. Pascual Jordan, *Die Physik des 20. Jahrhunderts* (Braunschweig : Vieweg, 1936).
36. Solomon, « Du "radium artificiel" à la conception de l'atome ».
37. Serge Wolikow, « Les gauches, l'antifascisme et le pacifisme », in *Histoire des gauches en France*, sous la dir. de Gilles Candar et Jean-Jacques Becker, t. 2 (Paris : Éditions La Découverte, 2005), 357-374.

en tant qu'intellectuels dans ce combat.

Le second article de Solomon publié dans *la Pensée* défend le déterminisme à partir d'une expérience de pensée, celle du passage d'électrons à travers un écran percé d'un trou circulaire, qui met en évidence le comportement ondulatoire de la matière par la diffraction du faisceau. Le choix de cette expérience est motivé, car elle est « l'exemple le plus simple où puisse se rencontrer la notion de probabilité en physique quantique.» Solomon s'illustre par ses qualités de pédagogue et il souhaite rendre son raisonnement accessible au lecteur non familier avec la mécanique quantique. L'argumentation est jalonnée de questions de bon sens que se poserait naturellement l'homme de la rue, pointant les contradictions apparentes, et qui permettent à Solomon, par ses réponses, d'avancer dans son raisonnement. Ce procédé rhétorique qui emploie une expérience de pensée couplée à la forme des questions-réponses rappelle à bien des égards le *Dialogue* de Galilée, ce « on» étant tantôt Sagredo, tantôt Simplicio, selon les questions posées.[38]

Solomon commence par interroger les théoriciens classique et quantique, qui décrivent chacun à leur manière le mouvement des électrons dans leurs modèles respectifs corpusculaire et ondulatoire. Bien évidemment, seule la théorie quantique permet d'expliquer l'apparition d'une figure de diffraction constituée d'une tâche brillante centrale entourée d'anneaux concentriques d'intensités décroissantes. La question que pose alors Solomon est de comprendre pourquoi une telle figure se produit sur l'écran :

> Pourquoi en effet nos électrons sont-ils déviés de leur route par l'écran percé d'un trou ? Si nous mesurons la vitesse de nos électrons à gauche et à droite de l'écran, nous voyons que leur vitesse a diminué (sauf pour ceux peu nombreux qui n'ont pas été déviés). Si leur vitesse a diminué, si leur énergie est moindre après le passage, c'est qu'ils en ont cédé à quelque autre corps, et ce corps ne peut être que l'écran.[39]

Solomon explique ainsi la déviation des électrons à l'origine de la figure de diffraction par des échanges d'énergie entre les électrons et l'écran. Ces échanges sont en principe déterministes. Solomon représente ces mouvements par un schéma reproduit par la figure 8.1. La modélisation de la diffraction par le tracé de ce qui semble être la direction des vecteurs d'onde est assez inhabituelle. En effet, ce sont habituellement les fronts d'onde (surfaces d'égale phase parallèles à l'écran) qui sont représentés. Solomon souhaite illustrer la modification de la trajectoire des électrons après leur franchissement du trou percé. Cependant, du point de vue ondulatoire, ces trajectoires n'ont pas de sens. C'est la principale faiblesse de la démonstration qui, comme nous allons le constater plus bas, mélange un déterminisme statistique et mécanique.

38. Entre autres éditions récentes du *Dialogue*, voir : Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1632 ; Paris : Le Seuil, 2010).
39. Solomon, « Les ondes de probabilité», 89.

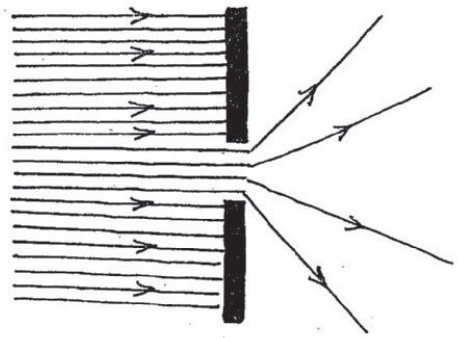


Fig. 8.1: Représentation par Solomon des trajets des électrons lorsqu'ils rencontrent un écran percé d'un trou.[41]

Toutefois, l'explication de la modification des trajectoires des électrons par échanges d'énergie supprime donc tout subjectivisme de la théorie et invalide par la même occasion la thèse de Jordan :

> Ainsi la physique quantique nous montre que si les électrons sont déviés, ce n'est pas « par un libre choix », cela résulte du fait qu'ils ont cédé de l'énergie à l'écran matériel. Le phénomène quantique est donc déterminé au sens large que donnait Laplace quand il disait : « Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur et comme la cause de celui qui va suivre. »[40]

La fin de la citation souligne que Solomon ne renie pas le principe général de causalité tel que formulé par Laplace, ce qu'il rejette c'est « la forme spéciale que Laplace lui avait donnée autrefois », autrement dit, le déterminisme classique. Solomon explique que l'enseignement de la mécanique quantique est que ces échanges d'énergie ne sont pas contrôlables par le physicien, raison pour laquelle l'ancien déterminisme n'est plus valable :

> Assurément, cet échange d'énergie entre la particule et l'écran échappe à notre contrôle. Si l'on cherchait à mesurer la vitesse que prend l'écran à la suite du choc qu'il a fait subir à la particule diffractée, il ne pourra plus être fixé, il devra être articulé à un système mécanique quelconque de mesure de la vitesse et l'on montre alors, qu'à chaque choc, il subira un déplacement appréciable tel que le tremblement qui en résultera « noiera » complètement la figure de diffraction.[42]

Solomon opère ici à une modification du dispositif expérimental en permettant à l'écran percé de se mouvoir, en l'accrochant par exemple à un ressort. Ce nouveau dispositif est semblable à celui proposé par Bohr dans sa réponse à Einstein qui avait

40. Solomon, « Les ondes de probabilité », 89.
41. Jacques Solomon, « Les ondes de probabilité », *La Pensée* 2 (1939) : 88.
42. Ibid.

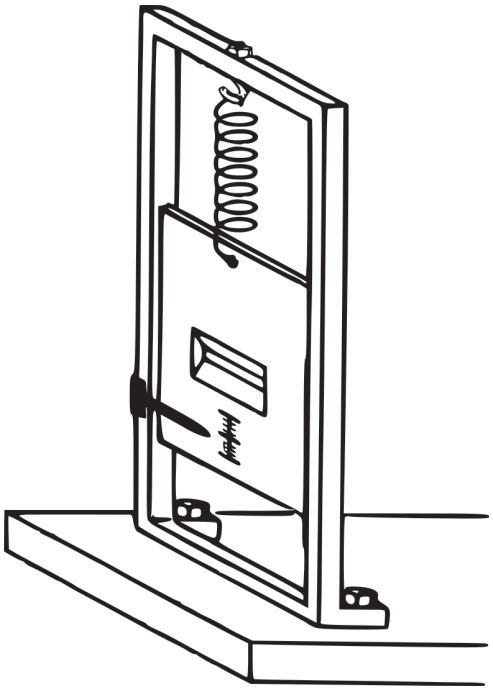


Fig. 8.2: Débat Bohr-Einstein : Dispositif de diffraction par un diaphragme suspendu à des ressorts.[43]

imaginé quant à lui une expérience invalidant les relations de Heisenberg (voir la figure 8.2). Cet épisode fait partie des désormais célèbres « débats Bohr-Einstein » qui ont commencé au Conseil Solvay de 1927 pour se poursuivre durant toutes les années 1930. L'objectif de Bohr dans cette expérience est d'illustrer que la mesure du transfert d'impulsion entre les électrons et l'écran percé, suspendu à un ressort, ne viole pas les relations de Heisenberg. L'argument de Bohr face à Einstein est qu'il faut traiter les mouvements de l'écran quantiquement, c'est-à-dire qu'ils sont eux aussi soumis aux relations de Heisenberg. Ainsi, toute mesure de la position de la fente grâce à l'échelle graduée introduit une incertitude sur la mesure de son impulsion.

Chez Solomon, le dispositif est employé à une autre fin. Il souhaite illustrer que l'impossibilité de contrôler, c'est-à-dire de mesurer, les échanges d'énergie possède une explication tout à fait physique. Pour pouvoir mesurer le transfert d'impulsion entre les électrons et l'écran, il faudrait rendre l'écran mobile, mais alors les « tremblements » occasionnés détruiraient la figure de diffraction, car ils modifieraient les trajectoires des électrons. Solomon en conclut une interprétation réaliste de la fonction d'onde :

> L'onde de probabilité n'est pas une onde qui nous indique comment le hasard distribue les électrons dans les diverses directions : elle nous indique comment se distribue l'échange d'énergie entre les divers électrons.[44]

43. Niels Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, sous la dir. de Catherine Chevalley, trad. Edmond Bauer et Rolland Omnès (Paris : Gallimard, 1991), 220.
44. Ibid., 89–90.

Il faut remarquer que Solomon réalise malgré lui une concession de taille aux variables cachées lorsqu'il affirme qu'« il y a bien détermination, mais celle-ci nous échappe avant qu'elle se produise.»[45] L'indéterminisme quantique n'apparait plus comme une conséquence de la dualité onde-corpuscule, mais comme une absence de contrôle de l'observateur sur le système. Avec pertinence, Céline Colin remarque que, contrairement à Bohr, Solomon traite classiquement le mouvement de l'écran percé par la fente en proposant une explication mécanique, non quantique, affaiblissant du même coup tout le raisonnement.[46]

La dernière question que se pose Solomon et à laquelle il répond de manière peu convaincante est « pourquoi [les électrons] ne subissent-ils pas tous, identiques comme ils sont, la même perte d'énergie ?» Cette question est en effet la condition d'existence de la figure de diffraction. La réponse est pour le moins évasive puisqu'elle consiste à attribuer à la longueur d'onde λ un rôle analogue à celui de la dimension des particules classiques, qui délimiterait « une sorte de zone d'influence de l'électron, de région de solidarité» et à invoquer l'existence de « relations nouvelles entre le mobile et le mouvement, entre le mobile et l'espace qui l'environne et qui est inséparable de son mouvement. C'est là le fond de ce qu'expriment les équations de la mécanique des quanta.»[47]

La conclusion de Colin à laquelle nous souscrivons est que le mélange entre mécanisme classique et quantique empêtre la démonstration de Solomon dans des contradictions desquelles elle ne peut pas sortir.[48] Cette utilisation des concepts classiques et l'ambigüité de certaines formulations n'indiquent pas qu'il se serait éloigné des positions complémentaristes. Colin suggère qu'il a peut-être souhaité rendre son raisonnement plus accessible pour *la Pensée*, dont le lectorat est un public éduqué, mais non spécialiste. Ceci l'aurait contraint à certaines simplifications et concessions qui, en contrepartie, obscurcissent les raisonnements.

En conclusion de ces brèves analyses des interprétations de la mécanique quantique selon Langevin et Solomon, nous pouvons affirmer sans réserve qu'ils acceptent la théorie quantique dans sa formulation standard. Dans le cas spécifique de Solomon, il s'agit même d'un soutien revendiqué à la complémentarité. Leur attitude envers la théorie peut donc être qualifiée de positive. Ils opèrent toutefois une claire distinction entre le formalisme de la théorie et son interprétation. Ils mettent alors en garde contre les raccourcis interprétatifs qui voudraient jeter le bébé déterministe avec l'eau mécaniste. La mécanique quantique les questionne sur les fondements de leur philosophie réaliste, ou matérialiste. Dans le cas de Langevin, le nouveau déterminisme sta-

45. Solomon, « Les ondes de probabilité», 89.
46. Colin, « Jacques Solomon et l'interprétation de la théorie quantique», 235.
47. Solomon, « Les ondes de probabilité», 90.
48. Colin, « Jacques Solomon et l'interprétation de la théorie quantique», 236–238.

tistique trouve un débouché dans la pratique politique, en s'opposant au fatalisme afin de dégager une issue alternative à un conflit mondial qui semble pourtant inéluctable. Cependant, leurs tentatives d'interprétation réaliste ne sont pas exemptes de contradictions internes par des approches qui, justement, ne parviennent pas à entièrement s'émanciper de tout mécanisme. Nos conclusions rejoignent celles de Vila Valls qui qualifie l'attitude majoritaire des physiciens français de l'entre-deux-guerre envers la mécanique quantique de cryptomécaniste, qui est l'expression d'un compromis entre leurs anciennes conceptions épistémologiques classiques et les nouvelles imposées par la nouvelle physique.[49]

Enfin, chez Langevin et Solomon, il faut noter que la philosophie marxiste apparait en filigrane, comme une matrice de pensée générale qui permet d'envisager dialectiquement les rapports entre la matière et son environnement. En aucun cas, elle n'apparait chez ces deux physiciens comme une vérité apportée de l'extérieur et qui permettrait d'analyser et d'évaluer *a priori* la connaissance scientifique. Les références explicites aux fondateurs du marxisme classique, Marx, Engels et Lénine, sont absentes. La seule référence de Solomon au matérialisme dialectique se situe en toute fin d'article lorsqu'il conclut que « jamais assurément la science n'a confirmé avec autant de vigueur que matière et mouvement sont inséparables»,[50] qui est une référence subtile à la célèbre phrase de l'*Anti-Dühring* « La matière sans mouvement est tout aussi inconcevable que le mouvement sans matière.»[51] Comme nous allons le montrer dans la section suivante, ce rapport au marxisme et à ses textes canoniques évolue considérablement après la Guerre.

8.2 Le débat quantique dans le PCF de l'après-guerre

Cette seconde partie de chapitre aborde le débat quantique à l'intérieur du PCF après la Seconde Guerre mondiale qui, comme nous aurons l'occasion de le constater, peut se résumer à partir des années 1950 en un positionnement pour ou contre l'ICMQ. Notre objectif est d'analyser ce débat, de comprendre les arguments des différents acteurs et de les comparer avec ceux mobilisés dans le contexte académique. Cependant, une étude hors-sol qui serait centrée uniquement sur l'étude d'articles et privée de toute contextualisation manquerait inévitablement sa cible. En effet, ce débat se déroule dans une période historique particulière, celle de la Guerre froide, dans

49. Vila Valls, « Entre causalisme et positivisme La réception épistémologique de la mécanique quantique par les théoriciens français de la génération de l'entre-deux-guerres».
50. Solomon, « Les ondes de probabilité», 90.
51. Friedrich Engels, *Anti-Dühring : Monsieur E. Dühring bouleverse la science*, trad. Émile Bottigelli (1878 ; Paris : Les Éditions Sociales, 1977).

laquelle plusieurs échelles, qui disposent chacune d'une temporalité propre, vont influer sur les positions des uns et des autres au cours du débat.

La première échelle est le temps du débat quantique en tant que tel. Il faut alors distinguer deux sous périodes, avant et après l'arrivée de l'ICMQ en 1952, lorsque Schatzman la présente une première fois dans les colonnes de la *la Pensée*. L'article de Schatzman et ce qui se dessine comme une prise de position officielle du PCF envers l'ICMQ à partir de décembre 1954 vont être les éléments déclencheurs de la controverse.

La seconde correspond à la politique volontariste que mène le PCF envers les intellectuels et les scientifiques. Elle est guidée selon les impératifs propres du Parti en matière d'organisation interne et de ses priorités dans son combat politique. Le discours officiel du PCF sur la science et la culture, particulièrement entre 1949 et 1950 lorsqu'il distingue la science prolétarienne de la science bourgeoise, constitue dans un premier temps un prisme idéologique au travers duquel la mécanique quantique est analysée jusqu'à ce que cette distinction soit condamnée. De plus, la direction du PCF fixe les modalités du débat puisqu'elle fournit le support matériel, en l'occurrence la revue militante, dans laquelle les physiciens vont pouvoir s'exprimer.

Enfin, la troisième et dernière échelle est celle de l'évolution de la situation politique en URSS. Les débats sur les sciences qui ont cours en Union soviétique, avec un temps fort pendant la période dite du « jdanovisme» entre 1946 et 1953, vont avoir un impact sur l'attitude des cadres dirigeants du PCF et des physiciens dans une période d'idolâtrie et de glorification de la société soviétique. Plus largement, les physiciens sont, comme tous les membres du Parti, sensibles à l'évolution du contexte géopolitique globale et des tensions qui se créent pendant la Guerre froide. La mort de Staline en 1953 ainsi que « l'année 1956», marquée à la fois par la dénonciation officielle des crimes de Staline par Nikita Khrouchtchev au XXe congrès du Parti communiste de l'Union soviétique (PCUS) et, dans un sens contraire, l'écrasement du soulèvement populaire de Budapest, vont immanquablement marquer les esprits. Certains adhérents, dont des physiciens, vont alors sérieusement commencer à interroger le sens de leur engagement communiste et, par ricochet, leur attachement au matérialisme dialectique.[52]

8.2.1 La lutte idéologique au sein du PCF

La doctrine Jdanov et les sciences soviétiques

L'intense lutte idéologique menée par les communistes dans les sciences et la culture pendant l'après-guerre est habituellement associée à la période appelée « jdanovisme», ou « doctrine Jdanov», d'après Andreï Jdanov, numéro deux du PCUS et

52. À propos de l'impact de cette année 1956 au sein du PCF, voir : Pascal Carreau, éd., *Le Parti communiste français et l'année 1956* (Fondation Gabriel Péri, 2007).

protégé de Staline, chargé par le Politburo des questions idéologiques.

Cette période débute à l'été 1946 et marque le début de la Guerre froide pour se poursuivre jusqu'en 1953, à la mort de Staline. Elle touche toutes les sphères de la société soviétique. En politique, elle correspond, à la création du Kominform en septembre 1947 par Staline,[53] et à la théorisation de l'existence de deux camps, impérialiste et pacifiste, en réponse à la doctrine Truman des États-Unis et la mise en place du plan Marshall.[54] Dans le domaine artistique et littéraire, le jdanovisme instaure un contrôle strict de la production en vue de valoriser les œuvres qui exaltent l'Union soviétique et dénoncent le cosmopolitisme. Dans le monde académique, elle se traduit par une campagne visant à renforcer la cohérence idéologique au sein du Parti.

La conférence des philosophes présidée par Jdanov qui s'ouvre le 16 juin 1947 pendant plus d'une semaine marque une étape décisive en ce sens.[55] Alors que les dirigeants du Parti se sentent légitimes pour émettre un avis sur la littérature, la musique et les arts, ils laissent au contraire les discussions académiques s'opérer entre les différents spécialistes de ces domaines. C'est ainsi que les philosophes membres du Parti sont invités par le Comité central à émettre leur avis sur l'ouvrage du philosophe Georgy Fedorovich Alexandrov *L'histoire de la philosophie occidentale* publié en 1945. Alexandrov est à l'époque un bureaucrate modèle qui connait une ascension fulgurante dans l'appareil pour se retrouver en 1940, à seulement 32 ans, propulsé responsable du Département de l'Agitprop auprès du Comité central. Toutefois, Staline n'apprécie guère l'ouvrage du philosophe et missionne Jdanov d'organiser une conférence afin que les philosophes du parti, qui ne sont pas tenus au courant de la manœuvre, puissent critiquer ouvertement le critiquer. Une démarche à laquelle ils ne sont pas habitués. À la fin de la conférence, Alexandrov est invité à faire son autocritique dans laquelle il reconnait sa trop grande complaisance envers les philosophies réactionnaires prémarxistes ainsi qu'un académisme trop prononcé dans sa présentation du marxisme qui en amoindrit la dimension révolutionnaire. Il se maintient trois mois supplémentaires à l'Agitprop pour être remplacé en septembre par Mikhail Suslov. La conférence est un énorme succès en raison du nombre de participants et son retentissement va aller bien au-delà de la manœuvre de couloir. À son issue, l'importante revue *Questions de philosophie* (*Voprosy Filosofii*) est lancée. La décision est alors prise de décliner ce

53. Littéralement le « Bureau d'information », qui remplace le Komintern ou IIIe Internationale, après la liquidation de cette dernière par Staline en 1943. À propos de l'histoire de l'Internationale communiste, voir : Pierre Broué, *Histoire de l'Internationale communiste (1919–1943)* (Paris : Fayard, 1997).

54. À propos de la mise en place du plan Marshall et de sa déclinaison dans les sciences, voir : John Krige, *American Hegemony and the Postwar Reconstruction of Science in Europe* (Cambridge, MA : MIT Press, 2006), 15–56.

55. Concernant le jdanovisme et les sciences, voir le chapitre 8 de : Alexei Kojevnikov, *Stalin's Great Science : The Times and Adventures of Soviet Physicists* (Londres : Imperial College Press, 2004), 188–216.

type de conférence dans d'autres disciplines académiques. C'est ainsi que quatre autres se tiennent entre 1948 et 1952, en linguistique (1948), biologie (1948), physiologie (1950) et économie politique (1952). La conférence de 1948 sur la biologie demeurera célèbre pour la promotion des thèses de Trofim Lyssenko et la condamnation de la biologie mendélienne.[56]

La grande absente de ces conférences est la physique. Plusieurs fois reportée, elle est finalement annulée. La physique ne connait donc pas le même sort que celui réservé à la biologie, vraisemblablement sauvée par la bombe atomique. Face au risque de retard qu'aurait engendré une dispute philosophique impliquant les physiciens les plus brillants du pays, la bureaucratie a su raison gardée.[57] Ce n'est pas pour autant que la physique est complètement délaissée. Dans son discours du 24 juin 1947 lors de la clôture de la conférence des philosophes, Jdanov dresse un constat sévère sur la décadence de la « science bourgeoise » et condamne, tour à tour, certains courants en relativité générale et en mécanique quantique :

> La science bourgeoise contemporaine fournit au cléricalisme, au fidéisme, une nouvelle argumentation qu'il faut démasquer impitoyablement. Prenez ne fût-ce que la théorie de l'astronome anglais Eddington sur les constantes physiques du monde qui ramène tout droit à la mystique pythagoricienne des nombres et, de formules mathématiques, déduit des « constantes essentielles » du monde, telles que les nombres apocalyptiques 666, etc. [...]Dans une égale mesure, les subterfuges kantiens des physiciens atomistes contemporains les amènent à des déductions sur le « libre arbitre » de l'électron, à des essais pour ne représenter la matière comme un ensemble d'ondes et à d'autres diableries.[58]

Après le discours de Jdanov et la mise au pilori du physicien bohrien Moisey Markov par Maksimov l'année suivante, l'historien Loren Graham qualifie la période qui s'étend entre 1948 et 1958 de « bannissement de la complémentarité » en Union soviétique. Dès lors, Fock demeure le seul représentant de cette interprétation qui la défend encore publiquement, quoique beaucoup plus timidement. L'interprétation de la mécanique quantique la plus diffusée devient celle des ensembles statistiques de Blokhintzev, soutenue par le principal philosophe du parti, Omel'ianovskii. Les théories à variables cachées font également leur apparition dans les journaux et conférences de philosophes et de physiciens, notamment par l'intermédiaire de Terletski qui est

56. À propos de l'affaire Lyssenko, voir : David Joravsky, *The Lysenko Affair* (Chicago, IL : University of Chicago Press, 1970) ; Concernant l'héritage du lyssenkisme dans l'épigénétisme contemporain, voir : Loren R. Graham, *Lysenko's Ghost : Epigenetics and Russia* (Cambridge, MA : Harvard University Press, 2016).

57. À propos de l'histoire de cette conférence avortée, voir : Ethan Pollock, *Stalin and the Soviet Science Wars* (Princeton, NJ : Princeton University Press, 2006), 72–103.

58. Andreï Jdanov, *Sur la littérature, la philosophie et la musique*, 2nd édition. Préface d'Aragon. (Paris : Éditions de la Nouvelle Critique, 1950), 70.

cependant critique de l'approche de Bohm et de Vigier.[59]

La structuration de la lutte idéologique au sein du PCF

Au PCF, la réorganisation du travail idéologique démarre en amont de la Guerre froide et l'arrivée de la doctrine Jdanov. La thématique est inscrite à l'ordre du jour du Comité central dès la reprise de l'activité légale à la Libération. À l'automne 1944, les sections des intellectuels sont créées et sont directement rattachées au Comité central. Pour un parti ouvrier, leur mission prioritaire consiste en l'éducation politique des adhérents intellectuels et scientifiques afin de maintenir l'homogénéité idéologique du Parti, en luttant en particulier contre certaines conceptions universitaires « petites-bourgeoises ».

Avec le début de la Guerre froide, le travail idéologique va aller en s'intensifiant. Laurent Casanova est nommé en janvier 1947 à la tête de la Section centrale des intellectuels. Ce dernier va profondément en réorganiser le travail.[60]

En 1948, Casanova propose au secrétariat que le Parti édite sa propre revue. Les *Cahiers du communisme* annoncent en avril la création de *la Nouvelle Critique, Revue du matérialisme militant*, pour « répondre aux besoins accrus de la bataille idéologique, en un moment où la réaction fait un effort considérable de diffusion de ses mensonges, de ses calomnies, de ses idées malsaines. »[61] Casanova considère que *la Pensée*, par son approche trop académique, n'est pas l'outil adéquat pour répondre aux défis de la lutte idéologique qui s'annoncent en ce début de Guerre froide. Le Parti a besoin d'une revue beaucoup plus militante, qui évalue la culture avant tout selon les objectifs politiques fixés par sa direction. Au contraire, *la Pensée* dirigée par Cogniot conserve une approche plus traditionnelle qui maintient une certaine distinction entre culture et politique.[62]

59. Graham, *Science, Philosophy, and Human Behavior in the Soviet Union*, 325–327.

60. Deniz Uztopal, «Pouvoir ideologique et savoir scientifique. L'histoire sociale de la Science et des scientifiques communistes français dans la Guerre froide (1945-1956)» (thèse de doct., Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2012), 428–430 ; À propos du rapport entretenu par le PCF et les intellectuels de manière générale, de la Première Guerre mondiale jusqu'en 1960, voir l'ouvrage : David Caute, *Communism & the French Intellectuals 1914–1960* (New York City, NY : Macmillan, 1964) ; Pour une histoire des intellectuels français au XXe siècle, voir : Pascal Ory et Jean-François Sirinelli, *Les Intellectuels en France, de l'Affaire Dreyfus à nos jours* (Paris : Armand Colin, 1986) ; À noter que nous mobilisons à plusieurs reprises les travaux de Verdès-Leroux au cours de ce chapitre. Nous sommes réservés quant à sa thèse d'un adhésion de ces intellectuels au PCF comme un moyen peur eux de gagner une reconnaissance qu'ils ne parviennent pas à acquérir au sein de leur champ académique. Cependant, nous reconnaissons à l'auteure un travail richement documenté, notamment par sa série d'entretiens. Pour une critique des travaux de Verdès-Leroux, voir : Frédérique Matonti, *Intellectuels Communistes : Essai sur l'obéissance politique. La Nouvelle Critique (1967–1980)* (Paris : La Découverte, 2005), 7–8.

61. «La Nouvelle Critique», *Cahiers du communisme*, avril 1948, 454-455 ; Cité dans : Jeannine Verdès-Leroux, *Au service du Parti : Le parti communiste, les intellectuels et la culture (1944–1956)* (Paris : Fayard/Éditions de Minuit, 1983), 179.

62. À propos de la naissance de *la Nouvelle Critique*, voir : Verdès-Leroux, *Au service du Parti*, 179–188.

Le travail envers les intellectuels du parti se structure en « cercles idéologiques», placés sous la direction de Victor Leduc, lui-même comptable devant la Section idéologique du Comité central dirigée par François Billoux. La nécessité de créer des cercles coïncide avec la tourmente créée par l'affaire Lyssenko. Pour beaucoup de scientifiques membres du Parti, dont les plus connus sont Marcel Prenant et Georges Teissier, les thèses de l'agronome soviétique ne tiennent pas et ils refusent en conséquence de les soutenir au nom de la discipline de parti.[63] Pour faire face à cette situation, la direction s'assigne l'objectif de veiller à la cohérence idéologique de ses intellectuels. C'est ainsi qu'en février 1949, elle convoque un rassemblement de ses intellectuels à la salle Wagram afin d'expliquer les positions du Parti sur les sciences. À cette occasion, Laurent Casanova y développe l'idée de l'existence d'une « science prolétarienne» qui s'opposerait à une « science bourgeoise». Le lyssenkisme est érigé en porte-étendard de la science prolétarienne, qui promet un avenir radieux dans une société d'abondance grâce à la perspective d'incroyables rendements agricoles. À noter que Deniz Uztopal dissocie le lyssenkisme du concept de « science prolétarienne» dans la mesure où le lyssenkisme n'a pas eu besoin de la théorisation de l'existence des deux sciences pour naitre dans les années 1930 et pour perdurer jusqu'en 1964 en URSS.[64] Jusqu'à sa condamnation officielle par Staline en 1950, la distinction entre les sciences prolétarienne et bourgeoise constitue la matrice idéologique officielle du PCF. Casanova publie une autocritique en demi-teinte en 1951 dans laquelle il dit préférer l'emploi du terme science « d'avant-garde», ou « socialiste», afin de qualifier la science soviétique.[65] Chez les physiciens, Gérard Vassails, l'un des principaux promoteurs de cette doctrine, la condamne publiquement en mars 1953 lors des journées des intellectuels d'Ivry comme « une erreur fondamentale», arguant qu'une telle division « tend à mettre sous le boisseau l'objectivité des lois de nature.»[66] Pierre Daix, rédacteur en chef des *Lettres Françaises* et vice-président de la Section idéologique, se demande pour sa part en pleine déstalinisation « quelles furent les conséquences pratiques des interventions de Jdanov ? Eut-il une responsabilité et laquelle dans le fait que certaines critiques lancées contre des intellectuels eurent pour ceux-ci des suites fâcheuses, voire périlleuses ?»[67]

Avant l'automne 1951, la direction du PCF ne mène pas de travail différencié envers les scientifiques de celui envers les intellectuels en général. Ce n'est qu'à partir de cette

63. Uztopal, « Pouvoir ideologique et savoir scientifique. L'histoire sociale de la Science et des scientifiques communistes français dans la Guerre froide (1945-1956)», 437.

64. Deniz Uztopal, «La réception en France du lyssenkisme, les scientifiques communistes français et la conceptualisation de la "science prolétarienne" (1948-1956)», *Cahiers d'histoire. Revue d'histoire critique* 122 (2014) : 121-141.

65. Laurent Casanova, «À propos de la science», *NC* 30 (1951) : 9-16.

66. Gérard Vassails, «Documents des journées nationales d'études des intellectuels communistes (Ivry, 29-30 mars 1953)», *NC* 45 (1953) : 147.

67. François Lurçat, «Lettre à Maurice Nadeau», *NC* 84 (1957) : 61-68.

date que sont créés des cercles de scientifiques par spécialités.[68] Cette réorganisation coïncide également avec l'intégration des cercles au sein des fédérations du PCF en tant que cellules, en particulier celle de la Seine qui en accueille la majorité. La direction souhaite massifier le travail envers les scientifiques, en l'orientant davantage vers l'extérieur, alors qu'il était jusqu'à présent essentiellement dirigé en interne, par l'éducation politique des scientifiques membres du Parti. Avec cette décentralisation, il est décrété que la lutte idéologique est une affaire de tout un chacun, et chaque membre des cercles est invité à y participer activement au sein de sa cellule.

Les cercles idéologiques perdurent jusqu'en 1955, lorsqu'éclatent une série de crises internes causées par le malaise grandissant des scientifiques vis-à-vis des positions prises par leur Parti relativement aux sciences. L'épisode le plus marquant est la réunion des intellectuels communistes du Ve arrondissement de Paris convoquée par le bureau de la section le 19 mars 1955 à la salle des cheminots de Paris. En raison de sa localisation géographique en plein cœur du Quartier latin, cette section rassemble de nombreux intellectuels et scientifiques. En particulier, Fer et Vigier y sont rattachés. Fer préside d'ailleurs la réunion et il est chargé de faire le rapport introductif, vraisemblablement en tant que secrétaire de la section.[69]

À l'origine, cette réunion vise à faire un point général sur la « lutte idéologique en liaison avec la lutte politique de masse. » La discussion doit s'orienter autour de thématiques diverses, de la liaison entre les institutions sociales et le progrès de la science, la question de l'idéalisme dans les diverses disciplines scientifiques, mais aussi des questions plus politiques comme « l'invasion de l'impérialisme américain dans le domaine scientifique. » Sans en préciser la nature, la convocation invite également les communistes à réfléchir sur les erreurs commises dans le passé afin d'en tirer des leçons pour l'avenir :

> Là où des erreurs aussi bien sectaires qu'opportunistes ont été commises, il convient d'en pousser l'analyse sur une base marxiste léniniste, pour en éviter le renouvellement, et dans une discussion franche et fraternelle

Dans le rapport de la réunion rédigé par Victor Leduc, invité comme Roger Garaudy en tant que responsable des Cercles idéologiques, on apprend que la discussion va en réalité entièrement tourner autour de ce point précis pour éclipser les autres sujets de l'ordre du jour.[70] La réunion tourne en une véritable fronde de la quasi-totalité

68. Il existe des cercles de philosophes, physiciens, chimistes, biologistes, médecins, psychologues, sociologues, historiens, géographes, économistes et linguistes.

69. Archives du PCF, La Lutte idéologique en liaison avec la lutte politique de masse, 19 mars 1955, Fonds Francis Cohen – La Nouvelle Critique, 1954–1994 – 354J68 : Activité/fonctionnement, 1954–1979, Archives départementales de la Seine-Saint-Denis, Bobigny.

70. Victor Leduc, Note au Secrétariat sur la réunion des intellectuels communistes du Ve du samedi 19 mars 1955, 31 mars 1955, Fonds Victor Leduc (F delta res 761/2 : Victor Leduc et le PCF), Bibliothèque de documentation internationale contemporaine, Nanterre.

des scientifiques présents pour critiquer les choix pris par la direction sur les sciences depuis 1948. Le mathématicien Ernest Kahane y dénonce notamment la déviance gauchiste de la distinction entre science bourgeoise et science prolétarienne. Malheureusement pour notre étude, le compte-rendu de Leduc ne précise pas le positionnement de Fer dans le débat. Nous pouvons seulement inférer, qu'en qualité de secrétaire de section et d'animateur de la réunion, il est plus que probable qu'il défende le point de vue de la direction du PCF, mais ces indications sont toutefois insuffisantes. Par exemple, ses articles publiés dans *la Nouvelle Critique* ne nous permettent pas de véritablement statuer sur son rapport à la division entre science bourgeoisie et science prolétarienne. En 1951, il dénonce bel et bien le « pourrissement de la science bourgeoise », mais c'est avant tout dans la perspective de dénoncer le manque de moyens et l'orientation de la recherche vers les secteurs rentables, et il ne l'oppose à aucun moment à une science prolétarienne.[71]

Les conséquences de cette réunion des intellectuels du Ve arrondissement de Paris sont sans appel. Face à l'insupportable remise en cause de son autorité, la direction du PCF décide de liquider les cercles idéologiques pour les remplacer par autant de commissions qu'elle place sous son contrôle direct.[72] Par ce geste, la direction rappelle que c'est elle qui délimite le périmètre de la critique et qu'il n'est pas toléré d'en sortir.

Enfin, précisions que le nombre de scientifiques membres du PCF à cette période est difficile à évaluer avec précision. À partir des participants aux rencontres nationales des cercles, dont celle d'Ivry en mars 1953, Uztopal estime ce nombre entre 60 et 70, avec une large majorité de physiciens (30–40), suivis par les biologistes (15), et enfin les chimistes et les sciences de la terre (10). Ce nombre aurait augmenté pour atteindre 100 en 1956. La région parisienne est surreprésentée avec environ 70% des effectifs, ce qui n'est pas étonnant compte tenu du maillage universitaire français à cette époque.[73]

Les trois fronts de la lutte idéologique en physique

En physique, la lutte idéologique engagée par le PCF pendant la Guerre froide se mène simultanément sur trois fronts distincts.[74]

Le premier concerne les revendications politiques du Parti en matière d'enseignement et de recherche. Celles-ci portent sur des sujets variés qui collent avec l'actualité : la lutte pour la paix et contre la course à l'armement atomique pendant toute la durée de la Guerre froide ; la dénonciation de l'éviction de Frédéric Joliot-Curie de la tête du CEA en 1950 consécutivement à son soutien à l'*appel de Stockholm* lancé par le Mouvement mondial des partisans de la paix ; l'opposition à la création du CERN,

71. Francis Fer, « Pourrissent de la science bourgeoise », *NC* 27 (1951) : 59-67.
72. Uztopal, « Pouvoir ideologique et savoir scientifique. L'histoire sociale de la Science et des scientifiques communistes français dans la Guerre froide (1945-1956) », 513–518.
73. Ibid., 443–445.
74. Jean Joyeux, « A propos de la lutte idéologique en physique », *NC* 76 (1956) : 104.

perçue comme une ingérence américaine dans la politique de recherche européenne ; les revendications « syndicales » d'augmentation des crédits de la recherche et du traitement des travailleurs scientifiques, etc.

Le second front concerne la valorisation de la science soviétique. D'une part, cela consiste en l'écriture d'articles faisant état de l'avancement de la recherche soviétique en vue de la glorifier. D'autre part, le PCF traduit régulièrement des articles soviétiques pour les publier, soit sous forme d'articles dans *la Nouvelle Critique* et *la Pensée*, soit sous forme de livres. C'est dans cette perspective que parait l'ouvrage *Questions scientifiques* en 1952 qui, à travers ses six volumes, propose un ensemble de textes d'auteurs soviétiques sur autant de champs scientifiques. Le premier volume parait en 1952 et aborde la physique, dont la mécanique quantique par les articles de Blokhintzev et Terletski.[75]

Enfin, le dernier front consiste en la lutte contre l'idéalisme en physique, particulièrement dans le domaine des quanta. Il est celui qui nous concerne directement ici.

Ces trois dimensions de la lutte idéologique en physique ne sont pas étanches les une des autres et des passerelles existent. En particulier, les discussions soviétiques en mécanique quantique vont alimenter le débat français. De plus, les Soviétiques s'intéressent de près aux travaux de Vigier et de ses collaborateurs, bien que pour en émettre un avis critique la plupart du temps. Ces trois fronts constituent les principaux axes dans lesquels les communistes dépensent leur énergie militante et guident leur action en tant qu'intellectuels. Aussi, les rôles ne sont pas cloisonnés et les physiciens agissent sur les trois fronts. Par exemple, Lurçat intervient dans la controverse, participe à la traduction et à l'édition de *Questions Scientifiques* et saura défendre à l'occasion la supériorité de la science soviétique,[76] Vigier prend aussi part au travail politique de défense de l'enseignement et de la recherche,[77] et certains, comme Schatzman et Joyeux,[78] abordent ces trois dimensions de la lutte idéologique simultanément dans leurs écrits et tentent une synthèse.

8.2.2 Le débat quantique au sein du PCF avant l'arrivée de l'interprétation causale (1946–1952)

Les physiciens n'ont pas attendu le discours de Jdanov dénonçant le libre arbitre de l'électron pour engager la lutte contre l'idéalisme sur le terrain des quanta. Halbwachs, alors agrégé de physique et futur collaborateur de Vigier, annonce dans son cours de philosophie donné à l'Université Nouvelle que la guerre est déclarée contre

75. La Nouvelle Critique, *Questions scientifiques (Physique)*.
76. François Lurçat, « La science et les hommes en Union soviétique », *NC* 90 (1957) : 97-125.
77. Jean-Pierre Vigier, « Pour la défense de la recherche scientifique française », *NC* 72 (1956) : 5-10.
78. Schatzman, « Physique quantique et réalité » ; Joyeux, « A propos de la lutte idéologique en physique ».

les principes de la science et qu'il va falloir entrer en résistance :

> Tout d'abord, je ne ferai qu'une rapide allusion aux *luttes très ardentes* que se livrent en ce moment les matérialistes et leurs adversaires autour de certains résultats fondamentaux de la physique moderne. On peut dire en effet que si la période que nous traversons se déroule sous le signe de la guerre, ce n'est pas seulement sur le front d'Allemagne, mais aussi sur le front des *quanta*, depuis que le physicien idéaliste James Jeans a déclaré qu'il était désormais possible scientifiquement d'admettre l'intervention de Dieu dans les phénomènes atomiques. Dans ce combat, le matérialisme dialectique est non seulement un *drapeau* autour duquel se rallient des combattants tels que Paul Langevin et Frédéric Joliot, mais il est aussi une *arme* précise et perfectionnée par laquelle l'adversaire sera inéluctablement surclassé et subira prochainement un Stalingrad philosophique.[79]

Ce n'est cependant pas dans l'exposé de Halbwachs que se trouvent les munitions en quantité suffisante pour alimenter l'arme du matérialisme dialectique dans la lutte contre l'idéalisme en mécanique quantique. Halbwachs restreint en effet sa présentation académique de la dialectique matérialiste dans le cadre de la physique classique. La mécanique quantique est à peine abordée, et ce uniquement par le biais de l'indéterminisme. Inspiré par l'analyse de Langevin, Halbwachs précise que l'indéterminisme n'est qu'apparent, puisqu'il est la manifestation des limites de l'applicabilité des concepts d'onde et de corpuscule au monde quantique, et « c'est parce que nous posons le problème dans un langage inadéquat que la nature nous répond par la relation d'incertitude dans le langage des probabilités qui, tiré du monde à notre échelle, est lui aussi sans doute inadéquat.»[80] À noter que cette explication de l'indéterminisme en tant que limitation de l'applicabilité des concepts d'onde et de corpuscule diffère sensiblement de celle proposée par l'ICMQ et à laquelle Halbwachs finira par adhérer. Pour cette dernière, l'indéterminisme reflète en effet la nature statistique des lois de la mécanique quantique.

Entre 1948 et 1952, avant que l'ICMQ ne fasse son entrée dans les débats, nous avons recensé cinq articles publiés dans *la Pensée* et *la Nouvelle Critique* qui se rapportent à l'interprétation de la mécanique quantique. Un article de Halbwachs, qui est une recension critique d'un ouvrage de philosophie de la physique du professeur agrégé Ulysse Filippi,[81] un article du Soviétique Sergey Vavilov extrait d'une conférence donnée à Lomonov en 1947,[82] ainsi que trois articles de Gérard Vassails.[83] Le

79. Francis Halbwachs, *Matérialisme dialectique et sciences physicochimiques : Cours de philosophie, fascicule VI*, Les cours de l'Université Nouvelle (Paris : Éditions sociales, 1946), 1.
80. Ibid., 24.
81. Francis Halbwachs, «De la connaissance du monde physique», *La Pensée* 17 (1948) : 79-86.
82. Sergey Ivanovich Vavilov, «Lénine et la physique moderne», *La Pensée* 23 (1949) : 27-34.
83. Gérard Vassails, «La politisation des atomes ou le prétendu "indéterminisme" en physique», *NC* 12 (1950) : 57-72 ; Gérard Vassails, «Dialectique du hasard», *La Pensée* 36 (1951) : 21-30 ; Gérard Vassails, «La physique soviétique ... sur pièces», *NC* 38 (1952) : 128-136.

cas de Vavilov mérite une courte digression. Il est à ce moment-là le président de l'Académie des sciences de Russie, après avoir poursuivi une brillante carrière de physicien. Il est notamment connu pour la détection de l'effet Vavilov-Tcherenkov en 1934, équivalent pour la lumière à l'onde de choc causée par le déplacement du son dans l'air, pour lequel Tcherenkov obtiendra le prix Nobel en 1958. Il est le frère du généticien Nikolai Vavilov, arrêté en 1941 puis mort de faim en prison en 1943. Selon Kojevnikov, alors que Nikolai est un bolchevique convaincu depuis les années 1920, Sergey est un religieux conservateur dans les années 1930 et 1940. Il a alors appris à devenir un bon stalinien, en portant le masque et en apprenant à maitriser parfaitement les règles du jeu.[84] Ses écrits sur la mécanique quantique, dont celui mentionné plus haut, sont en réalité de purs exercices de style qui ne renferment aucune conviction. Néanmoins, les codes sont maitrisés et la contrefaçon n'est pas repérée.

Une première caractéristique partagée par tous ces textes est leur propension à l'exégèse des classiques du marxisme. Ces physiciens vont puiser dans ces ouvrages l'essentiel de leur argumentation contre l'indéterminisme quantique. Leurs textes sont parsemés de citations de Marx, Engels et Lénine qui sont employés comme des arguments d'autorité. Par exemple, Vavilov explique les relations d'incertitude de Heisenberg à partir du concept de relativité et absolutisme des connaissances de Lénine :

> Tout le monde connait les tentatives de faire reposer les principes de l'indéterminisme sur la « relation d'incertitude ». Il est bon à ce propos de rappeler comment Lénine disait que le matérialisme dialectique insiste sur le caractère relatif, approximatif de tous ces jalons de la connaissance de la nature que pose le progrès de la science humaine. La « relation d'incertitude » n'est pas autre chose que l'expression de la nature relative et approximative de nos anciennes conceptions mécanistes.[85]

Gérard Vassails va chercher dans la *Dialectique de la Nature* de Engels la réponse à von Neumann sur le statut du hasard dans la mécanique quantique :

> La science bourgeoise de la nature a ignoré généralement cette découverte, la considérant, dit Engels dans la note déjà citée, « comme des jeux de paradoxes ». Elle
>
> > s'est obstinée d'une part dans l'absence d'idées de la métaphysique de Wolff, qui veut que quelque chose soit ou bien contingent ou bien nécessaire, mais non les deux à la fois, et d'autre part dans le déterminisme mécaniste à la pensée non moins vide, qui supprime en bloc le hasard en le niant en paroles pour le reconnaître en pratique dans chaque cas particulier.[86][[Il s'agit de Christian Wolff (1679–1754), philosophe allemand. À propos de la métaphysique de Wolff, voir :]Arnaud2002a

84. Kojevnikov, *Stalin's Great Science*, 184–185.
85. Vavilov, « Lénine et la physique moderne », 33.
86. Engels, *Dialectique de la nature*, 222.

> De là les absurdités à la von Neumann sur la contingence absolue. Du moment que le mouvement de l'électron, dans un espace de dimensions atomiques, n'est pas conforme à un schéma déterministe, mécaniste, et qu'il présente quelque fortuité, ils prennent le contrepied métaphysique du déterminisme et proclament le règne du « hasard pur ».

Cette utilisation abondante des références à la littérature marxiste du XIXe et du début du XXe siècles – soit avant l'arrivée de la mécanique quantique – est une différence majeure avec les écrits de Langevin et de Solomon de la période d'avant-guerre. Les classiques du marxisme ne sont pas les seules références présentes dans ces textes, Vassails, après avoir cité Staline,[87] mentionne Poincaré et Cournot,[88] mais ils sont néanmoins prépondérants. La dialectique matérialiste est érigée en guide pour les sciences, qui les éclaire et grâce à laquelle le physicien va pouvoir évaluer les théories à l'aide de catégories abstraites (tels le hasard, la nécessite et la contingence) et ainsi trouver le chemin de la vérité. La dialectique matérialiste en devient transcendante à la science. Comme le précise Charbonnat, cette scolastique ne correspond pas à la démarche originelle des fondateurs du marxisme. Ceux-ci ont procédé par un mouvement inverse, de l'étude approfondie de la science de leur temps afin d'en dégager les lois générales de la dialectique. Charbonnat souligne ainsi le paradoxe que « jamais la philosophie de Marx et d'Engels [...] n'a été autant lue et partagée que sous l'emprise stalinienne, et jamais elle n'a été autant déformée et révisée. » Cette transfiguration du marxisme, Charbonnat l'explique dans la perspective générale de l'évolution du mouvement communiste international et de la période de réaction qui succède à la Révolution russe de 1917 à partir du milieu des années 1920. Cette révision du marxisme correspond à une adaptation nécessaire pour se conformer aux besoins idéologiques de la bureaucratie. D'une doctrine critique, elle devient une pensée figée, un outil d'asservissement vidé de son essence révolutionnaire.[89]

La deuxième caractéristique de ces écrits est qu'ils n'attaquent pas véritablement la théorie quantique dans ses fondements. Les physiciens comme Halbwachs et Vassails ne remettent en cause ni le formalisme quantique ni ses conséquences physiques et se concentrent sur la critique des interprétations idéalistes. Ils se restreignent à des discours d'une portée générale contre les tentatives de remettre en cause le déterminisme et l'objectivité des lois naturelles. Par ailleurs, Vassails ne s'oppose pas au hasard qui « se manifestera dans tous les domaines explorés par la science, puisqu'il est le complément nécessaire de toute loi », mais, précise-t-il, la science ne peut en rester là et « la tâche de la physique à venir est de dépasser la statistique quantique, de pénétrer le

87. Que nous ne catégorisons pas comme faisant partie des classiques du marxisme, quand bien même Staline fait partie pour ces physiciens des continuateurs de la pensée de Marx, Engels et Lénine jusque dans le milieu des années 1950. Vassails, « Dialectique du hasard », 23.
88. Ibid., 24.
89. Charbonnat, *Histoire des philosophies matérialistes*, 502–505.

saut quantique individuel, d'analyser le quantum d'action.»[90] Ce dernier passage peut s'interpréter comme un appel à compléter ou à dépasser la théorie quantique. Cependant, la proposition de Vassails ne s'accompagne d'aucune proposition concrète. Elle se dresse avant tout contre l'idée d'un horizon indépassable de la connaissance. Vassails critique en particulier l'expression « relations d'indétermination» de Heisenberg. Il considère en effet que ces relations expriment un réel indéterminisme seulement pour « les physiciens quantistes [qui] continuent de raisonner sur une "position instantanée" et sur une "impulsion instantanée", alors que ces concepts ne reflètent aucune réalité objective dans le domaine de la mécanique quantique.»[91] En outre, Vassails enjoint les marxistes à renoncer à la notion de trajectoire dans le domaine quantique, à l'opposé du programme de l'ICMQ.

Le troisième et dernier point à souligner est que Bohr et Heisenberg ne sont pas encore devenus les principales cibles des critiques communistes. Dans les articles de Halbwachs de 1947, de Vavilov et de Vassails de 1951, leurs noms ne sont d'ailleurs même pas cités parmi les physiciens idéalistes.[92] La première critique explicite de Bohr, Heisenberg et von Neumann que nous avons recensée survient lors d'une allocution prononcée par Vassails à la Sorbonne le 23 janvier 1951 dans le cadre de l'Union Rationaliste. Vassails y critique alors ce qu'il considère être, en particulier chez von Neumann, la thèse idéaliste de l'influence de la conscience de l'observateur sur le système pour expliquer l'effondrement du paquet d'onde.[93] À partir de 1952, avec la sortie de l'ouvrage *Questions Scientifiques*, les critiques contre l'idéalisme et le positivisme de Bohr et de Heisenberg se précisent dans le sillon des critiques soviétiques contre la complémentarité.[94] À ce propos, il faut remarquer une certaine ironie de l'histoire puisque de Broglie est quant à lui davantage sous le feu des critiques. En 1951, Vassails n'hésite pas à ranger le physicien français du côté des physiciens bourgeois :

> De nombreux théoriciens bourgeois prétendent que c'est là chose impossible, qu'avec le quantum d'action la science a atteint « les ultimes arcanes de la réalité» (L. de Broglie), « le secret de la substance dés choses» (Jeans), « la réalité fondamentale» (F. Perrin), etc.. La même illusion comique fut nourrie au siècle dernier par les physiciens mécanistes au sujet de l'atome proclamé « ultime particule» de la matière, puis au sujet de l'électron. Lénine, dès 1908, répliquait : « l'électron est aussi inépuisable que l'atome». Soyons certains que le quantum d'action est un monde aussi inépuisable que l'électron.[95]

90. Vassails, « Dialectique du hasard», 30.
91. Gérard Vassails, «Le soi-disant indéterminisme en physique quantique», *Les Cahiers Rationalistes* 116 (1951) : 16.
92. Nous n'avons pas pu vérifier cette information dans l'article de Vassails daté de 1950 publié dans *la Nouvelle Critique*.
93. Vassails, « Le soi-disant indéterminisme en physique quantique», 17–18.
94. Vassails, « La physique soviétique ... sur pièces».
95. Vassails, « Dialectique du hasard», 30.

Après son revirement de l'automne 1952, ce même de Broglie sera alors largement salué par les intellectuels du Parti.

8.3 L'accueil controversé de l'interprétation causale par les communistes

8.3.1 Un accueil initial chaleureux

Évry Schatzman est le premier à populariser la théorie des variables cachées de Bohm dans le milieu communiste français par la publication d'un article au printemps 1952 dans *la Pensée*, sobrement intitulé « Physique quantique et réalité ».[96] Schatzman ne participe que marginalement au développement théorique de l'ICMQ, mais il manifeste par contre un vif intérêt pour le débat quantique en tant que tel. En outre, il est un habitué des colonnes de *la Pensée* puisqu'il y a déjà publié quatre articles depuis 1949 sur la cosmogonie, la cosmologie, l'astronomie soviétique et un de ses thèmes de prédilections en tant que physicien rationaliste, l'ufologie et la lutte contre les pseudosciences.[97]

À destination d'un lectorat éduqué composé majoritairement d'universitaires et de professeurs du secondaire, mais de disciplines hétéroclites,[98] son article à propos de la théorie des variables cachées aborde le sujet de manière pédagogique et moins dogmatique que les publications antérieures sur le même sujet. Il réserve à la seule conclusion un effet de manche présentant l'ICMQ comme une « théorie matérialiste, déterministe du mouvement de la matière » dont l'objectif est l'« élimination des interprétations idéalistes ».[99] Au contraire, le reste de l'article ne se réfère à aucun moment aux textes canoniques du marxisme pour se concentrer sur le cœur de son sujet. Schatzman introduit son propos par une histoire de la physique classique puis quantique, tout en précisant bien les termes du débat, en particulier sur le paradoxe EPR. En soi, l'article n'apporte pas de nouvel élément sur le plan interprétatif et il témoigne avant tout de l'enthousiasme du jeune physicien pour cette nouvelle interprétation de la mécanique quantique dont il se sent partie prenante. Il est tout de même remarquable que lorsqu'il s'agit d'expliquer la position de l'ISMQ de Bohr et de Heisenberg, Schatzman prenne en référence le manuel de de Broglie datant de 1930 *Introduction à l'étude de la mé-*

96. Schatzman, « Physique quantique et réalité ».
97. Évry Schatzman, « La théorie cosmogonique de Milne–Haldane », *La Pensée* 25 (1949) : 77-90 ; Évry Schatzman, « Cosmologie », *La Pensée* 33 (1950) : 104-106 ; Évry Schatzman, « Les astronomes soviétiques devant la nature », *La Pensée* 35 (1951) : 123-126 ; Évry Schatzman, « Les soucoupes volantes », *La Pensée* 36 (1951) : 87-90.
98. Verdès-Leroux, *Au service du Parti*, 188.
99. Schatzman, « Physique quantique et réalité », 122.

canique ondulatoire.[100] Au printemps 1952, de Broglie n'a pas encore complètement changé son fusil d'épaule et le climat est alors à la méfiance de la part de Schatzman et de Vigier à son égard (voir le chapitre 2).

L'article nous intéresse avant tout pour son procès d'écriture, dans la négociation entre Schatzman et le comité de rédaction de *la Pensée*, en l'occurrence avec le mathématicien Paul Labérenne et le physicien Gérard Vassails.[101] En effet, le soutien de l'ICMQ par les intellectuels influents du PCF n'est pas du tout acquis d'avance. Vassails précise, qu'en tant que physicien, il considère l'article avec un grand intérêt, mais, qu'en tant que membre du comité de rédaction, il doit tenir compte d'aspects politiques relatifs à la ligne éditoriale de la revue :

> Ton article, du point de vue que je viens de situer, présente deux inconvénients, deux défauts, à mon sens. Le premier est qu'il risque de faire apparaitre la science soviétique comme à l'arrière-plan par rapport à Einstein et ses disciples, et même par rapport à Louis de Broglie.
>
> Je me place du point de vue du lecteur moyen, et de l'impression générale que ton article lui produira. Je ne crois pas qu'il en retirera celle leçon, cette vérité historique, qu'aujourd'hui la science soviétique est à l'avant garde dans le domaine de la critique de l'interprétation de Bohr, Heisenberg, de l'appareil mathématique de la mécanique quantique, de l'élaboration de l'interprétation physique juste de cet appareil, de l'approfondissement, jusqu'à une théorie des processus individuels, de la mécanique quantique.[102]

La priorité de la revue est davantage à la diffusion et à la valorisation des thèses soviétiques sur les sciences de la nature auprès du public français, ce que ne fait pas suffisamment l'article de Schatzman aux yeux de Vassails. Le message a été entendu puisque dans un paragraphe Schatzman précise que, parmi les efforts actuels pour développer la théorie quantique au-delà de son stade actuel, les débats en cours en URSS sont, aux côtés des critiques et contributions d'Einstein, Bohm et Vigier, de la plus grande importance :

> En URSS, les discussions menées par Blokhintzev, par Terletski, ainsi que par Frenkel, Fok et autres posent clairement la question de la réalité objective des phénomènes individuels, de la réalité objective de la position et de la vitesse des particules, établissent la valeur de la mécanique quantique pour représenter les propriétés des ensembles statistiques, et mettent

100. Louis de Broglie, *Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire* (Paris : Librairie scientifique Hermann & Cie, 1930).

101. Vassails ne figure pas sur la liste du comité directeur de *la Pensée* présentée en première page, mais, de cette correspondance avec Schatzman, il parait évident qu'il est consulté pour les questions relatives à la physique

102. Gérard Vassails, Gérard Vassails à Évry Schatzman, 1952, Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/98), Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

en évidence les problèmes fondamentaux à résoudre.[103]

Sur le fond, Vassails conteste l'emploi de l'expression « théorie de la mesure », à la fois dans les théories de Bohr et de Bohm, pour expliquer l'interaction entre le système et l'appareil de mesure :

> La « la théorie de la mesure » est, non pas une interprétation de l'appareil mathématique de la mécanique quantique, interprétation que je considère, et que je l'ai démontré dans ma conférence de Lille du 2 mai denier, comme partie intégrante de l'interprétation de Bohr, comme indissolublement liée à la complémentarité des concepts classiques etc... mais une acquisition, une découverte authentique de la physique quantique.

Ainsi, Vassails considère que le problème de la mesure est uniquement de l'ordre de l'interprétation du formalisme mathématique de la mécanique quantique. En conséquence, le terme « théorie de la mesure », qu'emploie Schatzman dans son article, est pour lui inapproprié. Cette remarque de Vassails est cohérente avec l'attitude des communistes qui prévaut jusque-là envers la mécanique quantique : le débat sur les fondements se restreint à celui de l'interprétation du formalisme mathématique, dont la validité n'est pas remise en cause. Ce commentaire de Vassails souligne une divergence d'appréciation entre la vue majoritaire des communistes, qu'il exprime en tant que comité de rédaction de *la Pensée*, et celle de l'ICMQ, exprimée par Schatzman. En effet, dans l'ICMQ, comme le montre Bohm (voir section 1.2.2 page 51), les propriétés mesurées diffèrent de celles « réelles », qui ne sont pas accessibles à l'expérimentateur. En attribuant à chaque particule une vitesse et une quantité de mouvement, l'ICMQ fait plus que réinterpréter le formalisme pour le modifier. Ainsi, l'emploi de l'expression « théorie de la mesure » dans le cas de l'ICMQ est pertinent. Néanmoins, Vassails ne va pas imposer à Schatzman de modifier son article. Il veille surtout à ce que l'article ne contienne pas d'ambigüité, car [il] « crain[t] que le lecteur n'aperçoive pas le caractère essentiel de l'idée du rejet pur et simple de cette "théorie" [celle de Bohr]. »

Malgré ces critiques, l'accueil de l'interprétation est globalement positif. Le même Vassails écrit un an plus tard dans *la Nouvelle Critique*, donc après que de Broglie ait officiellement annoncé son retour à ces anciennes conceptions d'avant 1927, la confiance qu'il met dans l'entreprise de Vigier, de Broglie et Bohm :

> Des recherches guidées par une méthode juste et menées par un grand physicien ne peuvent pas aboutir à un échec complet : nul doute que Louis de Broglie et J.-P. Vigier n'ouvrent au développement de la Mécanique

103. Les archives de Schatzman ne contiennent pas les brouillons de l'article. Nous déduisons qu'il s'agit d'un ajout de Schatzman consécutif aux critiques de Vassails. Schatzman, « Physique quantique et réalité », 118.

> quantique, pour le grand honneur de la science française, une voie pleine de promesses.[104]

Eugène Cotton voit également d'un bon œil l'entreprise de l'ICMQ. Elle prouve d'après lui que le marxisme peut être créateur en sciences et, même si ce n'est pas l'unique voie à envisager, elle permet d'élargir la discussion en lien avec l'interprétation des Soviétiques ce qui ne peut être que profitable dans la lutte engagée par les communistes contre l'idéalisme en sciences.[105]

Peu de temps après la soutenance de la thèse de doctorat de Vigier le 11 décembre 1954, le philosophe Jean-Toussaint Desanti en publie une revue élogieuse dans l'*Humanité*. Il considère que la théorie est « parfaitement cohérente avec les principes du matérialisme», qu'il entend comme « la possibilité de connaître et de déterminer entièrement, sans lacunes, le mouvement des particules.»[106] Schatzman en propose également une recension dans les *Cahiers du communisme*, l'organe théorique du PCF.[107] Halbwachs publie à son tour une revue élogieuse de la thèse de Vigier, présentée comme une contribution décisive dans la perspective d'établir une science matérialiste.[108] Toutefois, dans le même numéro, le Soviétique Svechnikov, qui s'intéresse de près aux discussions françaises sur la mécanique quantique et à ses évolutions récentes, tempère l'enthousiasme des communistes envers l'ICMQ qu'il critique pour son mécanisme et argumente en faveur de l'interprétation des ensembles statistiques de Blokhintzev.[109] Cette intervention de Svechnikov préfigure déjà que le soutien des Soviétiques est loin d'être acquis pour les partisans de l'ICMQ.

8.3.2 De Broglie devient une personnalité respectable pour les communistes

Dans cet élan favorable envers l'ICMQ et après l'avoir vivement critiqué comme le principal diffuseur, en France, des thèses idéalistes en physique, les intellectuels communistes ne sont pas indifférents au second revirement de de Broglie. Bien que non marxiste, de Broglie avance dans la bonne direction depuis qu'il a rejoint les rangs de l'opposition à l'école de Copenhague. Cette attitude des communistes à son égard tranche radicalement avec celle des années passées. Alors qu'en 1951 Vassails rangeait

104. Gérard Vassails, «Louis de Broglie et l'indéterminisme physique», *NC* 43 (1953) : 137.
105. Eugène Cotton, «Documents des journées nationales d'études des intellectuels communistes (Ivry, 29-30 mars 1953) - Intervention du Cercle des physiciens», *NC* 45 (1953) : 172.
106. Jean-Toussaint Desanti, *L'Humanité*, 21 décembre 1954,
107. Évry Schatzman, «La thèse de Jean-Pierre Vigier sur "L'inteprétation causale de la physique quantique"», *Cahiers du communisme*, février 1955, 183-193.
108. Francis Halbwachs, «Une tentative pour édifier une microphysique matérialiste. A propos de la thèse de J.P. Vigier», *La Pensée* 61 (1955) : 36-48.
109. Gennadii A. Svechnikov, «La lutte contre l'indéterminisme dans la mécanique quantique», *La Pensée* 61 (1955) : 49-57.

de Broglie aux côtés des « scientifiques bourgeois», dont la démarche est antiscientifique par son aversion envers le déterminisme et le réalisme,[110] le même auteur, en 1953, quoiqu'il décèle des restes d'idéalisme et d'un certain cartésianisme, fait l'éloge du physicien qui, même s'il n'en a pas conscience, agit objectivement dans le sens d'une science marxiste :

> notre désaccord ici avec Louis de Broglie est accessoire. L'essentiel, c'est notre accord, accord plus large et plus profond encore lorsque, sans nous arrêter aux opinions philosophiques de ce physicien ou à leur forme d'expression, nous considérons la marche réelle de sa pensée, sa méthode véritable.[111]

L'attitude de Vassails envers de Broglie est représentative de celle de la majorité des intellectuels communistes de l'appareil : il est inutile de trop insister sur son passé bohrien puisqu'il a fait amende honorable. Dans la même direction, Eugène Cotton insinue qu'au fond de Broglie est un marxiste qui s'ignore :

> On connaît l'attitude récente de Louis de Broglie condamnant les thèses qu'il avait enseignées pendant vingt-cinq ans. Il est fort significatif de voir à quel point ses raisonnements actuels, reprenant sous une forme améliorée certains de ses travaux antérieurs, sont proches des raisonnements des physiciens soviétiques, et à quel point les savants se rapprochent parfois spontanément du matérialisme dialectique.[112]

Georges Cogniot, membre du Comité central, représentant du Parti auprès du Kominform et directeur de publication de *la Pensée*, souligne dans son allocution prononcée lors de la conférence organisée à l'occasion de la parution de la première édition française de la *Dialectique de la Nature* d'Engels que de Broglie, dans son discours au Centre International de Synthèse de 1952, a « attaqué le dogmatisme en des termes voisins de ceux-là mêmes que Staline a utilisés dans son étude sur la linguistique.»[113] De la part de Cogniot, de Broglie ne peut espérer un meilleur compliment. Certaines de ses prises de position en matière de politique scientifique sont également saluées, puisqu'elles rejoignent celles du PCF, comme son opposition à la création du CERN en 1952.[114] En 1953, Vigier explique le sens de sa collaboration avec de Broglie :

> Sur de telles positions peuvent se rejoindre tous les spécialistes de la mécanique quantique qui rejettent les positions positivistes de l'école de Copenhague (et qui peuvent différer d'avis sur d'autres questions philosophiques). Sur ces points-là, les positions d'Einstein, de Louis de Broglie,

110. Vassails, « Dialectique du hasard», 30.
111. Vassails, « Louis de Broglie et l'indéterminisme physique», 135.
112. Eugène Cotton, «Une importante contribution à la lutte contre l'indéterminisme en physique», *La Pensée* 50 (1953) : 100.
113. Cogniot est cité par Cotton. Cotton, « Documents des journées nationales d'études des intellectuels communistes (Ivry, 29-30 mars 1953) - Intervention du Cercle des physiciens», 171.
114. Ibid.

> de Bohm, ou les miennes sont bien les mêmes. C'est dans le cadre de telles conceptions que nous estimons qu'il est possible de faire progresser nos connaissances sur la réalité physique sous-jacente aux phénomènes décrits statistiquement par la théorie des quanta.[115]

Cette citation de Vigier peut être mise en perspective avec notre étude de la réception de la théorie de Bohm en France, des motifs du revirement de de Broglie et des conditions dans lesquelles les jeunes physiciens marxistes se sont alliés avec ce dernier (voir la section 2.3.2 page 78). Il serait alors tentant d'interpréter l'attitude de Vigier comme une tactique essentiellement opportuniste, visant principalement à profiter du prestige de de Broglie pour l'utiliser comme un argument d'autorité en faveur de l'ICMQ. À l'évidence, les communistes sont fiers que l'un des leurs soit un proche collaborateur du prix Nobel. Cependant, nous penchons plutôt en faveur de l'honnêteté de Vigier dans ses propos. Malgré les réticences et la suspicion initiale, Vigier a acquis au fil du temps une certaine admiration pour de Broglie avec lequel il partage beaucoup de points communs dans la manière d'aborder la théorie physique (voir la section 3.5 page 120).

En raison de cette collaboration, de Broglie acquiert un statut particulier chez les communistes. En 1960, *la Pensée* lui ouvre même ses colonnes à l'occasion de la discussion qu'elle lance sur la mécanique quantique. La rédaction reproduit en effet un article publié l'année précédente dans le *JPR* qui joue le rôle de contradicteur à Fock, qui défend pour sa part la complémentarité.[116] Cette ouverture interpelle puisque dans la période qui s'étend de 1939 à 1965, que ce soit dans *la Pensée* ou dans *la Nouvelle Critique*, nous n'avons recensé aucun autre article de scientifique non communiste. Une singularité qui illustre également la totale opacité du rapport de de Broglie avec la politique.

8.3.3 La polémique dans *la Nouvelle Critique* (1955–1958)

Sous l'impulsion de François Lurçat, cet accueil positif des travaux de Vigier par les intellectuels « officiels» du PCF provoque une rapide levée de boucliers d'autres physiciens. C'est ainsi que nait dans *la Nouvelle Critique* une vive polémique sur l'interprétation de la mécanique quantique qui s'étend de 1955 à 1958 dans laquelle pro et anti-ICMQ vont s'affronter par articles interposés. En effet, la principale caractéristique du débat quantique au sein du PCF de cette période est qu'il place l'ICMQ au centre, masquant *de facto* les éventuelles divergences au sein de ses opposants.

115. Jean-Pierre Vigier, «Lénine philosophe», *La Pensée* 51 (1953) : 66.
116. Vladimir A. Fock, «Critique épistémologique de théories récentes», *La Pensée* 91 (1960) : 8-15 ; Louis de Broglie, «L'interprétation de la mécanique ondulatoire», *La Pensée* 91 (1960) : 16-45.

Le débat Lurçat-Fer

L'article qui met le feu aux poudres est le compte-rendu de la thèse de Vigier par Lurçat publié dans *la Nouvelle Critique* en février 1955, soit deux mois après la soutenance en décembre.[117]

Lurçat commence par saluer l'originalité de la thèse de Vigier en précisant que « si ses résultats [...] sont confirmés par l'expérience, la physique aura fait un pas en avant très important.»[118] Il rappelle l'importance du questionnement philosophique pour les physiciens et regrette que « leur attitude se borne très souvent à traiter avec mépris et avec ignorance les dissertations philosophiques au sujet de leur science.» Comme il est de bon ton dans la période, il critique vertement l'interprétation idéaliste de Bohr-Heisenberg, mais tempère cependant la généralisation de Desanti quand il affirme que « l'autorité quasi théologique dont jouit encore, dans les milieux des physiciens français, l'idée contraire à la science que le monde de l'atome échappe à toute détermination objective.»[119] Lurçat distingue en effet les professeurs des expérimentateurs et théoriciens. Si la remarque s'applique aux premiers, car « souvent influencé[s] par la présentation idéaliste que l'on trouve dans la quasi-totalité des ouvrages d'enseignement et des traités», les seconds, en raison de leur travail quotidien d'observation et de calculs, sont, pour leur part, d'après la formulation de Lénine, « spontanément matérialistes».[120]

Lurçat précise toutefois que la voie dans laquelle s'est engagée Vigier « n'est pas la seule concevable pour un matérialiste.»[121] Il mentionne à ce propos les débats soviétiques en cours entre les interprétations de Blokhintzev et de Fock. Dans un article de 1953, Jean Charles relatait les positions des deux physiciens en se positionnant en faveur de Blokhintzev contre les « erreurs» de Fock.[122] Dans ce débat entre, Lurçat reste neutre. Contre Vigier, il préconise de se méfier « des suggestions du "bon sens"» qui chercheraient à appliquer les concepts classiques, dont la notion de trajectoire, au monde quantique. Il appuie son argumentation avec une longue citation de Langevin :

> L'expérience nous apprend alors qu'il n'est pas possible de connaître avec précision à la fois la position et la vitesse d'un corpuscule, en vue de la prévision de son mouvement ultérieur. Et nous en concluons tout de suite : les lois de la nature comportent une indétermination fondamentale ! Pourquoi ne pas admettre plutôt que notre conception corpusculaire est inadéquate, qu'il n'est pas possible de représenter le monde intraatomique en extrapolant jusqu'à l'extrême limite notre conception macroscopique, mé-

117. François Lurçat, «La thèse de Jean Pierre Vigier et l'état actuel de la physique quantique», *NC* 62 (1955) : 176-183.
118. Ibid., 176.
119. Ibid., 179.
120. Lénine, *Matérialisme et Empiriocriticisme*, 361.
121. Lurçat, « La thèse de Jean Pierre Vigier et l'état actuel de la physique quantique», 182.
122. Jean Charles, «Discussions en U.R.S.S sur la physique quantique», *NC* 50 (1953) : 224-226.

> caniste du mobile ? Si la nature ne répond pas de manière précise lorsque nous lui posons une question sur l'électron assimilé au corpuscule de la mécanique classique, il y a beaucoup de prétention de notre part à conclure : le déterminisme n'existe pas dans la nature. Il serait plus juste de dire : la question est mal posée, l'électron n'est pas assimilable au corpuscule de la mécanique classique. Il ne doit donc pas s'agir d'incriminer la nature, mais de changer – ce qui est plus difficile, en tout cas plus fécond – la façon même dont est formulée la question.[123]

Une option qui n'est pas envisagée par Vigier est que l'impossibilité de mesurer simultanément un couple de variables qui ne commutent pas, comme la position et la quantité de mouvement, ne reflète pas un indéterminisme intrinsèque, une borne à la connaissance, mais simplement que ce couple de grandeur ne se réalise pas simultanément à l'échelle microscopique. L'absence de trajectoire des particules quantiques signifierait simplement qu'elle n'existe pas à cette échelle. Lurçat adopte une interprétation minimale de l'objectivité telle que définie par Lénine :

> Il faut le répéter encore une fois avec Lénine que « l'unique propriété de la matière dont l'admission définit le matérialisme philosophique, c'est celle d'une réalité objective, d'exister en dehors de notre conscience».

Le point soulevé par Lurçat est de savoir quelle est la place du marxisme dans le travail quotidien du scientifique communiste. Pour Lurçat, le matérialisme dialectique ne peut en aucun pas se substituer à l'expérience pour disqualifier *a priori* une théorie. Lurçat conçoit le marxisme comme une méthode qui permet de généraliser les résultats de la science afin d'aider à mieux les interpréter. Les marxistes doivent ainsi savoir « distinguer, dans l'œuvre des savants, le contenu scientifique de l'écorce idéaliste dans laquelle il est souvent enrobé.»[124] et ne pas croire sur parole leurs auteurs quand ils interprètent leurs résultats. La prudence de Lurçat sur l'application des principes du matérialisme dialectique en science s'explique, en partie, par la peur de voir resurgir les erreurs du passé, l'ombre du lyssenkisme est encore proche. Il appuie son argumentation sur un article du mathématicien Sobolev publié par *la Nouvelle Critique* dans lequel le Russe se lance dans un plaidoyer contre l'attitude dogmatique adoptée dans le passé par certains scientifiques soviétiques envers la biologie, la relativité générale et la cybernétique.[125]

L'article de Lurçat ne manque pas de provoquer une réponse prompte et vive de Francis Fer en défense de l'ICMQ. Fer envoie une lettre à la rédaction de *la Nouvelle Critique*. Cette lettre est publiée conjointement avec une réponse de Lurçat.[126] La po-

123. Langevin, « La physique moderne et le déterminisme», 11–12.
124. Lurçat, « La thèse de Jean Pierre Vigier et l'état actuel de la physique quantique», 183.
125. Serguei L. Sobolev, «La critique scientifique, l'esprit novateur et le dogmatisme», *NC* 61 (1955) : 205-2011.
126. Francis Fer, «Une discussion à propos de l'indéterminisme en physique», *NC* 69 (1955) : 148-149 ; François Lurçat, «Une discussion à propos de l'indéterminisme en physique», *NC* 69 (1955) : 159-165.

lémique est lancée.

Fer conteste les conclusions de Lurçat, car il ne considère pas que le débat se restreigne au seul problème d'interprétation du formalisme de la mécanique quantique :

> Avec l'indéterminisme essentiel des phénomènes atomiques, c'est la démarche fondamentale de la science qui est remise en question, et avec elle la démarche de la connaissance en général, car la généralisation en tentante ; on conçoit qu'une erreur sur les fondements puisse avoir des conséquences incalculables sur le développement ultérieur de la théorie.[127]

Selon Fer, l'idéalisme aurait pénétré si profondément la mécanique quantique qu'elle se serait irrémédiablement écartée de la méthodologie scientifique. En conséquence, il n'est pas possible de simplement, comme le suggère Lurçat, séparer l'ivraie idéaliste du bon grain scientifique puisque ce sont les fondements mêmes de la théorie qui ne résistent pas à l'examen de la critique matérialiste. Il reproche principalement à l'ISMQ d'interdire certains questionnements légitimes, tel le dépassement des restrictions sur la précision des mesures. Fer n'exclut pas, qu'un jour, une particule plus « fine » que le photon permette de scruter la matière au-delà de ce que ne le permettent les relations de Heisenberg. Il prend pour exemple la découverte des rayons X au XIXe siècle dont personne ne soupçonnait l'existence avant leur mise en évidence expérimentale par Wilhelm Röntgen et appelle en conséquence à la prudence.[128] Cet argument du doute sur d'hypothétiques découvertes futures qui permettront de dépasser les restrictions sur la précision des mesures est un argument fréquent des partisans de l'ICMQ contre le supposé dogmatisme de l'ISMQ qui imposerait des limites arbitraires à la connaissance. Cependant, en l'absence d'une hypothèse physique concrète sur la nature d'un tel rayonnement – qui serait fondamentalement différent du rayonnement électromagnétique pour échapper aux lois quantiques – l'argument apparait bien faible. Il est d'ailleurs étonnant d'un point de vue matérialiste puisqu'il implique un scepticisme généralisé pour lequel aucune connaissance n'est acquise. En fin de compte, l'interprétation des inégalités de Heisenberg par Fer en tant que perturbation du système est enfermée dans un mécanisme qui est critiqué par les adversaires de l'ICMQ, mais aussi par les physiciens qui n'interviennent pas directement dans le débat comme Vassails.

Fer en conclut que les communistes doivent avoir une démarche volontariste et résolument s'impliquer dans la lutte contre l'indéterminisme en physique, ce qui passe par un soutien de Vigier, quand bien même l'ICMQ n'est pas sans failles :

> Kepler a, paraît-il, essayé vainement une centaine d'hypothèses avant de trouver celle qui décrit le mouvement des planètes. Peut-être les physiciens d'aujourd'hui seront-ils moins fortunés dans le déblaiement préalable. Faire le premier pas est néanmoins la seule façon de marcher, et, si les

127. Fer, « Une discussion à propos de l'indéterminisme en physique », 149.
128. Ibid., 153.

> hypothèses scientifiques de Vigier ne sont pas les meilleures, il en cherchera d'autres, j'imagine.[129]

De plus, Fer argumente que le débat dépasse amplement la simple discussion entre physiciens et philosophes pour s'inviter sur le terrain politique. Il note que les partisans de l'indéterminisme « insistent sur les prolongements dans des domaines où il n'avait apparemment que faire et où, chose curieuse, il apporte un renfort bien accueilli à la défense idéologique du régime capitaliste.»[130] À ce propos, il n'oublie pas de rappeler que Heisenberg a « aussi été un grand homme du IIIe Reich, et soutien actif du régime hitlérien»,[131] ce qui ne peut être qu'une simple coïncidence.[132] L'indéterminisme promu par Bohr et Heisenberg est donc utilisé consciemment par la bourgeoisie dans sa lutte contre le socialisme, et, « derrière le voile diaphane de l'indéterminisme quantique se cache la silhouette du capitalisme aux abois.»[133] L'argument de Fer est que dès lors que l'indéterminisme est érigé en une propriété fondamentale de la nature, plus aucune planification rationnelle de l'économie n'est envisageable. Il renvoie ainsi dans le camp des partisans de l'indéterminisme l'instrumentalisation de la science à des fins idéologiques :

> À ceux qui maintenant osent nous parler d'asservissement, il est aisé de répondre : l'asservissement réside là où l'on tente de sauver une cause perdue par un détournement de la raison. Les communistes, en défendant le déterminisme en physique et le marxisme en économie politique et en histoire, n'asservissent rien à rien : partout, c'est la même cause de la vérité et du progrès qu'ils défendent.[134]

Ce rapprochement entre le déterminisme dans les sphères de la physique et de la politique fait écho, mais dans un sens opposé, à la thèse de Langevin selon laquelle le nouvel indéterminisme quantique s'élève contre la fatalité. Ici, la sauvegarde du déterminisme apparait primordiale pour la planification économique et à l'organisation rationnelle de la société, selon l'idéal soviétique.

---

129. Ibid., 150.
130. Ibid., 157.
131. Ibid.
132. Le rôle qu'a joué Heisenberg pendant la Seconde Guerre mondiale est un sujet à controverse. Powers disculpe totalement le physicien et argue qu'il aurait volontairement retardé le projet nucléaire allemand. Rose, au contraire, dans un travail à charge, argumente que Heisenberg s'est volontairement mis au service du régime. Cependant, son explication de sa participation au programme nucléaire comme l'influence sur le physicien de la mentalité et de la culture germanique des XIXe et XXe siècles est une thèse contestable. Enfin, le travail de Cassidy semble être le plus rigoureux. Il ne disculpe pas Heisenberg, mais ne tombe pas pour autant dans l'excès. Thomas Powers, *Heisenberg's War : The Secret History Of The German Bomb* (Cambridge, MA : Da Capo Press, 2000) ; Paul Lawrence Rose, *Heisenberg and the Nazi Atomic Bomb Project, 1939–1945 : A Study in German Culture* (Berkeley et Los Angeles, CA : University of California Press, 2001) ; David C. Cassidy, *Beyond Uncertainty : Heisenberg, Quantum Physics, and The Bomb* (New York City, NY : Bellevue Literary Press, 2010).
133. Fer, « Une discussion à propos de l'indéterminisme en physique», 158.
134. Ibid.

Dans sa réponse à Fer, Lurçat rétorque qu'il n'a pas d'autre choix que de maintenir une certaine ambigüité à propos de la théorie causale et qu'il ne peut pas exprimer d'avis scientifique, pour la simple raison que la thèse de Vigier ne formule aucune hypothèse testable expérimentalement. En conséquence, il estime que son analyse ne peut que se situer dans le champ philosophique. Il accorde à Fer que l'idéalisme peut être un frein au progrès scientifique et que les conceptions des savants influencent nécessairement leur travail. La discussion entre philosophes et scientifiques est utile en cela : analyser, dans l'histoire des sciences, la place des conceptions dans l'élaboration des théories. Lurçat insiste également sur l'élargissement nécessaire du débat, pour ne pas rester focalisé sur les mêmes questions, car le marxisme, en tant que généralisation des résultats de la science, se doit avoir une vision d'ensemble. Cette discussion s'en tirera par le haut uniquement si toutes les composantes de la physique intègrent la discussion.

En note, le comité éditorial de *la Nouvelle Critique* acte les différences entre Lurçat et Fer, sans prendre parti pour l'un ou l'autre des physiciens, en se « félicitant qu'une discussion est ici ouverte.» Elle appelle même à la poursuite du débat et publiera « volontiers les réflexions et les remarques que pourront leur suggérer les textes qui précèdent.» Comme nous allons le constater, cette invitation au débat ne va pas profiter à l'ICMQ.

La réelle divergence entre Lurçat et Fer déborde du simple périmètre de l'interprétation de la mécanique quantique. Ce sont plus fondamentalement deux lectures différentes du marxisme qui s'expriment. En faisant du marxisme un outil de généralisation des résultats scientifiques, Lurçat souhaite marquer une rupture avec l'« orthodoxie» stalinienne, au risque cependant de diminuer la dimension ontologique de la dialectique présente chez Marx, Engels et Lénine. Il préfigure les courants dits hétérodoxes, dont le chef de fil en France est Henri Lefebvre[135] qui publie en 1958 son célèbre *Problèmes actuels du Marxisme* qui lui vaut d'être suspendu du PCF qu'il quitte alors définitivement.[136] Fer, de son côté, se situe davantage dans l'orthodoxie. Son discours volontariste interpelle toutefois tant il tranche avec les propos tenus dans sa thèse de doctorat. Dans l'introduction de celle-ci, il défend une position opposée et appelle à une stricte distinction entre la question interprétative, qui est le domaine du philosophe, et le travail théorique proprement dit du scientifique (voir la section 3.5.1 page 121).

135. Charbonnat, *Histoire des philosophies matérialistes*, 522–536.
136. Henri Lefèbvre, *Problèmes actuels du marxisme* (Paris : Presses Universitaires de France, 1958).

L'envenimement du débat : l'intervention de Joyeux et la réponse de Halbwachs

Jean Joyeux entre alors dans la controverse et enfonce le clou.[137] Le ton est plus acerbe que celui Lurçat envers l'ICMQ à laquelle il ne concède rien, mais également envers Terletski, dont *la Pensée* a publié un article dans son numéro de novembre-décembre 1955.[138]

Sa critique porte tant sur les aspects théoriques qu'idéologiques de l'ICMQ. Sur le plan scientifique, il estime que la théorie alourdit inutilement le formalisme mathématique avec comme unique débouché la réinterprétation de résultats déjà connus de longue date. L'opposition de Joyeux, sur ce point, est identique à celle de Lurçat, la théorie causale ne permet pas de tester les postulats qu'elle avance :

> il faut rappeler ici que l'unique critère pour la vérité d'une théorie est l'expérience et que toutes les connaissances en marxisme ne peuvent dicter à la nature ses lois du mouvement ni la forme avec lesquelles elles doivent apparaître (prendre un aspect concret pour nous). Le marxisme, aussi bien, n'a jamais prétendu à cela. Il s'enrichit au contraire en s'adaptant aux dernières découvertes scientifiques. Lénine a clairement montré l'importance décisive de l'expérience.[139]

Joyeux adopte une approche pragmatique vis-à-vis des théories physiques. Elles doivent répondre à des questionnements théoriques précis et se proposer de les résoudre, une qualité que ne possède pas l'ICMQ. Les incantations à de probables différences entre les deux interprétations à des échelles de grandeur de l'ordre de 10^{-13} cm qui permettront de les distinguer sur le terrain expérimental n'est pas un argument recevable pour Joyeux :

> Quelle est la meilleure voie pour un développement fructueux des recherches entreprises dans le cadre de l'interprétation causale ? Reconnaitre bien clairement le domaine de son étude et les caractères spécifiques des phénomènes physiques que l'on se propose d'étudier ; examiner les limites de la mécanique quantique ou de la théorie des champs ; élaborer nettement les différences auxquelles on doit s'attendre en s'appuyant sur l'interprétation causale et, comme dirait Fer, « se frayer la voie jusqu'à la confrontation avec les résultats expérimentaux, seule confrontation réalisatrice dans ce domaine ».[140]

Au lieu de perdre leur temps, Joyeux invite donc les physiciens communistes à apporter leur savoir-faire à l'amélioration de la TQC, théorie bien plus avancée que

137. Joyeux, « A propos de la lutte idéologique en physique ».
138. Jakow P. Terletski, « Le problème de la causalité en mécanique quantique », *La Pensée* 64 (1955) : 14-20.
139. Joyeux, « A propos de la lutte idéologique en physique », 107.
140. Ibid., 108.

l'ICMQ. Quant aux difficultés de la TQC, Joyeux appelle à ne pas les exagérer outre mesure, d'autant plus que la théorie continue de progresser, notamment dans le domaine nucléaire. Lurçat concédait à l'ICMQ d'être une possibilité d'interprétation déterministe, mais qu'elle ne peut pas prétendre être la seule. Il pointait l'existence d'une diversité des réflexions, notamment soviétiques, afin de mettre en garde contre les conclusions hâtives quant à la bonne interprétation de la mécanique quantique dans une perspective marxiste. Joyeux est beaucoup moins conciliant et dénie la prétention de l'ICMQ d'être conforme au marxisme, car il « il ne suffit pas de parler un champ matériel ou de l'imaginer pour douer de réalité l'objet en question et faire en conséquence une théorie physique plus matérialiste que les autres.»[141] Si la sentence n'est pas prononcée, Joyeux sous-entend fortement que Vigier et ses soutiens sombrent dans l'idéalisme en voulant faire correspondre la structure de la matière à leurs propres représentations mentales.

Ce procès en idéalisme est à mettre en relation avec le dernier argument de Joyeux centré sur une critique institutionnelle. Joyeux considère que Vigier et ses collaborateurs n'échappent pas au syndrome de la physique théorique française, qui serait de surcroit particulièrement aigu dans l'entourage de de Broglie à l'IHP : sa trop grande adoration pour une physique formelle et mathématique et son mépris, conscient ou non, pour la physique expérimentale. Ceci lui permet de conclure sur un point qui, d'après lui, est trop souvent négligé par les scientifiques communistes : la nécessité de réformer en profondeur, pour les moderniser, l'enseignement supérieur et la recherche française. Il établit ainsi un pont entre les graves carences de la recherche théorique française, dont Vigier et ses collaborateurs de l'IHP ne sont que l'expression, et les revendications du Parti concernant l'enseignement et la recherche : une augmentation sensible des chaires de physique théorique dans les facultés, une augmentation des moyens des laboratoires, car « l'idée que le théoricien n'a besoin que d'un peu de papier est à détruire complètement», la création d'un accélérateur de particules français et une recherche théorique plus en lien avec les expérimentateurs.

Le ton volontairement polémique de Joyeux provoque une réponse vive de Halbwachs. Il considère que Joyeux se trompe lorsqu'il affirme que la seule différence entre les deux interprétations est d'utiliser un vocabulaire différent.[142] Halbwachs insiste sur la non-linéarité qui est une propriété nouvelle et fondamentale mise en avant par l'ICMQ. Elle ouvre justement la voie pour une différenciation sur le terrain expérimental, mais il demande un peu de patiente pour laisser le temps à l'ICMQ de se perfectionner. L'objectif est bel et bien d'explorer les domaines de l'ordre de 10^{-13} cm où la non-linéarité se manifestera. L'ICMQ est donc un programme de recherche à part entière qui possède une vraie légitimité scientifique. Halbwachs marque également son

141. Joyeux, « A propos de la lutte idéologique en physique», 106.
142. Francis Halbwachs, «Matérialisme et physique quantique», *NC* 79 (1956) : 113-127.

désaccord avec le constat optimiste de ses adversaires quant à l'avenir de la TQC. À l'appui, il rappelle les éminents physiciens, tel Dirac, qui expriment eux aussi leurs inquiétudes. Halbwachs ne se permet pas d'émettre un avis définitif sur la capacité de la TQC de lever les difficultés rencontrées, mais il invite toutefois à la mesure et à la prudence. Il ajoute que la science progresse aussi en émettant de nouvelles hypothèses qui ne sont pas directement observables dans un premier temps, comme ce fut le cas pour l'existence des atomes. Les positivistes ont lutté contre cette hypothèse avec les mêmes arguments utilisés par l'école de Copenhague à propos des trajectoires des particules microscopiques.

Halbwachs reproche également aux adversaires de l'ICMQ de la critiquer sans pour autant proposer une interprétation cohérente de la mécanique quantique, qui explique par exemple en quoi l'indéterminisme quantique ne remet pas en question le principe de causalité. Puisque, d'après le marxisme, les lois scientifiques décrivent objectivement la matière en mouvement, il faut que le formalisme mathématique puisse s'interpréter sans ambigüité. C'est pour lui la principale qualité de l'ICMQ que de permettre cela. Il se défend ainsi d'un retour à une dichotomie entre science bourgeoise et science prolétarienne, abandonnée depuis le XIVe congrès du PCF du Havre qui s'est tenu au mois de juillet 1956, pour être remplacée par une distinction entre science idéaliste et science matérialiste. Toutefois, Halbwachs ne précise pas concrètement quels changements conceptuels cette nouvelle terminologie implique. Quant aux problèmes que traverse la physique française, il rejette la faute, d'une part, sur le gouvernement de Guy Mollet et sur le système économique, car la recherche « est conditionnée avant tout par la politique ouvertement malthusienne de la bourgeoisie française résultante elle-même de la situation économique et de ses difficultés sociales», et d'autre part, sur les États-Unis qui « s'attachent à recruter des physiciens en Europe et à attirer l'ensemble des théoriciens du monde capitaliste dans leur orbite idéologique.»[143]

L'excursion du débat en Union soviétique

Dans la dernière phase du débat, toujours suivant le même mode de l'article suivi de sa réponse par un contradicteur, interviennent Youri N. Demkov, un étudiant de Fock, et Georges Lochak, du groupe IHP. Ces deux articles sont en réalité des traductions d'articles déjà parus dans la revue soviétique *Questions de Philosophie* quelques mois auparavant. La rédaction de *la Nouvelle Critique* a jugé pertinent de les publier afin d'alimenter le débat.

L'article de Demkov se réfère directement à celui de Vigier publié dans la même revue (traduit en français dans *Recherches internationales à la lumière du marxisme*)[144]

143. Ibid., 127.

144. Jean-Pierre Vigier, «À propos de la théorie du comportement des micro–objets individuels», *Recherches internationales à la lumière du Marxisme* 4 (1957) : 130-160.

qu'il interprète comme une tentative du Français d'obtenir un soutien actif des physiciens soviétiques. L'objectif que se fixe de Demkov est alors clairement de saper tout espoir de réussite de Vigier dans son entreprise.

L'argumentation de Demkov est d'autant plus redoutable qu'elle sort du simple procès de l'absence de preuves expérimentales, qui était jusqu'à présent le principal argument des opposants à l'ICMQ, pour aller sur son propre terrain et en critiquer les fondements. Demkov remarque que toutes les difficultés de l'ISMQ se retrouvent également dans la théorie de Bohm, mais elles sont simplement masquées par le potentiel quantique :

> pas à pas, à mesure que l'on construit des schémas de correspondance entre le modèle de Bohm et la réalité physique objective, on est amené à remplacer les représentations classiques du modèle de Bohm par des représentations empruntées au schéma quantique habituel.[145]

Ainsi, selon Demkov, l'ICMQ n'offre pas une meilleure compréhension des phénomènes quantiques. Par contre, à l'instar de Joyeux, Demkov dénonce la lourdeur du formalisme. Il pointe en particulier la perte de symétrie entre les représentations positionnelle et impulsionnelle permise par l'analyse de Fourier pour favoriser la représentation positionnelle.

Demkov clarifie également la signification des deux postulats de la mécanique quantique critiqués par l'école déterministe : la complétude et l'interaction incontrôlable entre l'appareil de mesure et le système à cause du quantum d'action h.[146] Pour Demkov, le postulat de complétude de la mécanique quantique, c'est-à-dire que la fonction d'onde Ψ contient l'ensemble des connaissances sur le système, ne signifie absolument pas qu'il est impossible d'ajouter de nouveaux paramètres et degrés de liberté afin d'aller toujours plus loin dans la description de la réalité objective. Le spin, puis le spin isotopique ont été ajoutés au fur et à mesure des progrès réalisés par la théorie. Il s'agit simplement de l'affirmation que l'état objectif du système est décrit par la fonction d'onde, comme en mécanique classique il l'est par les coordonnée et vitesse de la particule. Quant à l'indéterminisme intrinsèque de la mécanique quantique, Demkov précise qu'il est la conséquence de l'application des concepts classiques au monde quantique :

> Lorsque nous examinons un problème d'un point de vue quantique conséquent, il ne se présente aucune difficulté : la relation d'indétermination se réalise automatiquement et l'interaction incontrôlable n'est nullement nécessaire. À leur époque, ces raisonnements aidèrent à trouver l'in-

145. Yuriy N. Demkov, « Sur les tentatives de reconsidérer l'interprétation statistique de la mécanique quantique », *NC* 93 (1957) : 114–115.
146. Ibid., 116–117.

terprétation probabiliste juste de la théorie quantique et à établir les limites de la théorie classique.[147]

Il est intéressant de noter que cet argument est identique à celui mobilisé par Langevin, Vassails et Halbwachs, avant qu'il ne rejoigne les rangs de l'ICMQ, contre les interprétations idéalistes des relations de Heisenberg.

Demkov précise que cette application des concepts classiques était initialement utile afin de décrire qualitativement le comportement des objets soumis aux lois de la mécanique quantique, en ayant recours par exemple aux expériences de pensée du genre de celle du microscope. L'emploi de ces concepts permettait justement d'expliciter les limites de la physique classique à l'échelle microscopique. Demkov n'exclut d'ailleurs pas que l'indéterminisme quantique soit levé un jour, mais il faudra alors dépasser les concepts quantiques. En effet, il précise qu'il considère impossible de franchir les limites d'une théorie à partir des concepts de cette même théorie. Ainsi, ce n'est pas des concepts classiques comme la notion de trajectoire, issus du monde macroscopique, que la théorie qui succèdera à la théorie quantique émergera. Cette description plus fine que la mécanique quantique ne pourra se faire que « sur la base de l'analyse et de la généralisation de données expérimentales, et non pas de tels ou tels raisonnements et conjectures arbitraires, non fondées sur l'expérience.»[148] Là aussi, l'accusation d'idéalisme envers les partisans de l'ICMQ est à peine voilée.

Nous sommes tentés d'effectuer un parallèle entre la conception chez Demkov des changements de théorie et les révolutions sociales telles que décrites par Marx et Engels. Après la Commune de Paris et l'écrasement de la population parisienne par les troupes Versaillaises d'Adolphe Thiers lors de la Semaine sanglante du 21 au 28 mai 1871, Marx tire une leçon politique importante qu'il la partage dans une lettre à Ludwig Kugelmann : « [d]ans le dernier chapitre de mon 18 Brumaire,[149] je remarque comme tu le verras si tu le relis que la prochaine tentative de la révolution en France devra consister non plus à faire passer la machine bureaucratique et militaire en d'autres mains, comme ce fut le cas jusqu'ici, mais à la détruire.»[150] C'est à partir de cette expérience de la Commune que Marx et Engels théorisent la dictature du prolétariat comme la phase transitoire nécessaire entre le capitalisme et la société communiste.[151] Ainsi, de même que les changements de régime politiques ne peuvent pas s'accomplir à l'intérieur des institutions sociales en place qui doivent être renversées et rempla-

147. Ibid., 117.
148. Ibid., 118.
149. Karl Marx, «Le 18 Brumaire de Louis Bonaparte», in *Les Luttes de Classes en France*, éd. établie et trad. Maximilien Rubel (1852 ; Paris : Folio, 2007), 169-314.
150. Karl Marx à Ludwig Kugelmann, in *Correspondance : Juillet 1870 – Décembre 1871*, par Karl Marx et Friedrich Engels, sous la dir. de Gilbert Badia, trad. Jean Mortier, Claude Mainfroy et Jean Wetzler, t. XI (Paris : Éditions sociales, 12 avril 1971).
151. Karl Marx, *La guerre civile en France : Adresse du Conseil général de l'Association internationale des Travailleurs* (1871 ; Paris : Mille et une nuits, 2007).

cées par de nouvelles, les révolutions en sciences doivent aussi apporter leurs nouveaux concepts qui vont se substituer aux anciens.

Enfin, Demkov retourne en atout la faiblesse supposée des prédictions de nature uniquement statistiques de la mécanique quantique. Demkov argumente qu'il devient inconséquent de vouloir supplanter les lois statistiques de la mécanique quantique puisque celles-ci sont à l'origine de la réussite de la théorie. De plus, ces lois sont largement éprouvées, car « dans la majorité écrasante des phénomènes de la nature, ce caractère statistique des microphénomènes conduit, par un effet de moyenne, à une détermination pratiquement univoque dans le domaine macroscopique.»[152] Demkov ne considère pas le recours aux statistiques comme une restriction de la connaissance, mais au contraire comme une « restriction de notre fantaisie», analogue à la restriction du mouvement perpétuel en mécanique classique et en thermodynamique ou encore le dépassement de la vitesse de la lumière en relativité. Les restrictions imposées par les relations d'indétermination sont donc interprétées positivement comme une plus grande connaissance de la réalité matérielle. Demkov conclut que tous les arguments des partisans de l'ICMQ sont contraires à la mécanique quantique et qu'aucune de ses hypothèses censées la différentier de la mécanique quantique usuelle n'a été, au bout de cinq ans, vérifiée expérimentalement, ce qu'il considère comme trop long sur l'échelle de temps du développement théorique de la physique. Avec un peu de mauvaise foi, il précise que « la mécanique quantique tout entière a été créée en moins de cinq ans.»[153]

Lochak communique une réponse à l'article de Demkov.[154] Il tente de se défendre face aux conclusions sévères du Soviétique, mais il reste désemparé. En cette fin d'année 1957, il se produit un tournant en URSS dont le physicien français a semble-t-il compris le sens : les temps ont changé et la partie est en train d'être perdue. La « branche soviétique de l'interprétation de Copenhague», minoritaire depuis 1947 avec l'instauration de la doctrine Jdanov,[155] est en train de regagner du terrain en URSS. Le point de départ de ce basculement est la visite de Fock à Copenhague pendant l'hiver 1957, qui est révélatrice de la période d'apaisement et de dégel sous Khrouchtchev qui contraste avec la doctrine des deux blocs de l'ère stalinienne. Lochak, quelque peu désabusé, conclut son article ainsi :

> On peut être matérialiste et n'être pas d'accord avec nous, mais on ne peut pas être matérialiste et chercher à nous faire taire. Je suis convaincu que l'article de Demkov [...] ne constitue pas un simple examen philosophique et physique d'une théorie, mais une tentative d'écraser une tendance

152. Demkov, « Sur les tentatives de reconsidérer l'interprétation statistique de la mécanique quantique», 120.
153. Ibid., 123.
154. Georges Lochak, «Sur les critiques de l'interprétation causale de la théorie des quanta», *NC* 93 (1957) : 123-140.
155. Graham, *Science, Philosophy, and Human Behavior in the Soviet Union*, 329.

> sous le poids et le prestige du courant dominant. Qu'il le veuille ou non, Demkov sert les intérêts de certains physiciens ou philosophes qui voudraient conserver dans la calme chaleur de son prestige, une théorie aux conquêtes glorieuses et qui n'a plus, comme on aurait dit au XIXe siècle, que « deux petits nuages sombres à l'horizon » : le problème des forces nucléaires et l'explication du spectre de masse des particules dites élémentaires.
>
> Je crois pouvoir enfin ajouter que les chercheurs travaillant sur l'interprétation causale ou sur toute autre théorie de ce type ne sont nullement disposés à se laisser rebuter par les difficultés techniques, ni surtout par une telle tentative de créer autour d'eux une atmosphère de crainte devant un nouveau « sabbah de sorcières ».

La fin de la controverse

L'article de Demkov et la réponse de Lochak marquent un coup d'arrêt à la polémique dans *la Nouvelle Critique*, scellant *de facto* la victoire du groupe Lurçat-Joyeux. Le même Cotton qui saluait hier l'importante contribution de Vigier, de Broglie et Bohm dans la lutte contre l'indéterminisme quantique se range derrière l'ISMQ. Dans un article sous forme d'autocritique du dogmatisme passé dans l'approche du Parti envers les sciences de la nature, Cotton reconnait que :

> La principale erreur dogmatique vient, à mon avis, d'une confusion sur le rôle même du matérialisme dialectique et de l'esprit de parti dans les sciences. La croyance en la réalité d'un monde extérieur régi par des lois, qui, avec l'antériorité de la matière sur l'esprit, constitue la base du matérialisme, est indispensable à toute science. Mais l'analyse du caractère dialectique des théories nouvelles doit suivre les progrès des sciences de la nature, sans se fier toujours aux analogies, car l'application même des lois dialectiques énoncées par Engels peut facilement donner lieu à des erreurs. Comme l'a dit Roger Garaudy dans son intervention au XIVe Congrès du PCF, on a eu tendance à juger une théorie scientifique, non pour son adéquation à la réalité contrôlée par l'expérience, « mais pour son apparente conformité avec les lois dialectiques déjà connues. »[156]

Pêle-mêle, ce sont toutes les anciennes conceptions sur la science qui sont rejetées, mettant sue le même plan la biologie de Lyssenko et l'ICMQ de la mécanique quantique :

> C'est ainsi que Jean-Pierre Vigier défend une théorie scientifique qui permet d'interpréter les résultats actuels de la mécanique quantique tout en paraissant plus matérialiste que l'interprétation traditionnelle. On ne peut conclure actuellement de la valeur scientifique de cette théorie, les vérifications expérimentales semblant impossibles et on ne peut que discuter

156. Eugène Cotton, « Quelques réflexions sur le matérialisme dialectique et les sciences de la nature », *NC* 94 (1958) : 112–113.

> sa complication et son interprétation philosophique.[...] L'avenir tranchera sur la part de vérité contenue dans la théorie de Bohm-de Broglie-Vigier en physique, sur la théorie de Lyssenko en biologie. Mais la majorité des physiciens communistes en France et en URSS ne croit pas en la première, la majorité des biologistes en la seconde.[157]

Cette condamnation de Cotton est saluée par Lurçat dans un article-fleuve « Sur le matérialisme dialectique et la physique» publié en deux parties, toujours dans *la Nouvelle Critique*.[158] L'autocritique de Cotton est perçue par Lurçat comme la preuve que le marxisme n'est pas une doctrine figée, mais qui sait, au contraire, s'adapter et se renouveler :

> Ceux qui désespèrent du marxisme, qui le voient sclérosé et incapable d'aborder les problèmes nouveaux devraient lire l'article d'Eugène Cotton sur le matérialisme dialectique et les sciences de la nature. La comparaison avec ce que nous écrivions il y a deux ou trois ans sur des sujets voisins est très encourageante.[159]

Conciliant et loin de tout triomphalisme, Lurçat reconnait à l'ICMQ d'avoir mis sur la table de sérieuses questions sur les fondements de la mécanique quantique qui méritaient d'être approfondies par les matérialistes et « c'est à [son] avis le plus grand compliment qu'on puisse [lui] faire. Cela veut dire que les tenants de cette école ont ramené l'attention des physiciens sur la nécessité d'*interpréter* correctement, de *comprendre* les concepts utilisés en physique.»[160]

En 1960, parait un article de Blokhintzev traduit par Lurçat qui est la transcription du discours donné lors de la conférence pansoviétique sur les problèmes philosophiques qui s'est tenue à Moscou en octobre 1958. Le Soviétique présente encore une fois les trois grandes interprétations qui se réclament du matérialisme dialectique : la sienne des ensembles, celle de type variables cachées de Bohm, Vigie, de Broglie et Terletski et de la complémentarité de Fock.[161] Cet épisode marque le dernier acte de la controverse au sein de *la Nouvelle Critique*.

Après cet article, la controverse se clôt d'elle-même, sans intervention d'une autorité politique ou intellectuelle. La situation s'apaise et la mécanique quantique devient un sujet beaucoup moins présent dans le sommaire de la revue. Comme le remarque Andrew Cross, la crise n'est pas résolue, mais disparait principalement parce que l'ob-

157. Cotton, « Quelques réflexions sur le matérialisme dialectique et les sciences de la nature», 113–114.
158. François Lurçat, «Sur le matérialisme dialectique et la physique», *NC* 97 (1958) : 135-147 ; François Lurçat, «Sur le matérialisme dialectique et la physique», Suite de la première partie de l'article paru dans le numéro 97, *NC* 98 (1958) : 133-152.
159. Lurçat, « Sur le matérialisme dialectique et la physique», 135.
160. Ibid., 150.
161. Blokhinzev, « Du développement de la physique actuelle».

jet du débat est devenu sans importance.[162] Le débat, qui a davantage des airs de lutte entre différentes fractions rivales, n'aboutit pas sur un consensus puisqu'aucune des parties n'a réussi à convaincre l'autre de la justesse de ses positions.

L'étonnante absence de Vigier de la controverse

Vigier est le grand absent de cette controverse qui, en tant que principale cible des attaques contre l'ICMQ, n'intervient pourtant jamais pour défendre sa cause. Pendant toute la période du débat, il publie quatre articles, deux dans *la Nouvelle Critique* et deux autres dans *la Pensée*. Le premier à propos de Lénine,[163] que nous avons déjà évoqué (voir la section 5.2.3 page 164), est la retranscription de son intervention dans le cadre du colloque « Lénine philosophe et savant» organisé par *la Pensée* en mars 1954. Le second est une traduction d'un court article publié en Russie dans un ouvrage dirigé par Terletski regroupant les contributions de treize physiciens parmi lesquels figurent de Broglie, Vassails, Feynman et Born.[164] Vigier y développe une analyse d'ensemble de l'ICMQ, sans se référer à la controverse française. Les deux articles publiés dans *la Nouvelle Critique* n'y sont pas non plus rattachés. Le premier, de 1956, porte sur la défense de la recherche française par la revendication de plus de moyens matériels et humains.[165] Le second, de 1958, aborde les particules élémentaires en physique. Vigier y évoque brièvement l'ICMQ par le biais du niveau subquantique, mais sans pour autant faire référence aux débats qui se déroulent dans la même revue.[166]

En l'absence de sources complémentaires, il nous est malheureusement difficile d'aller au-delà du simple constat. Un témoignage d'un physicien anonyme recueilli par Verdès-Leroux, que l'on devine à l'époque dans l'entourage de Vigier, relate :

> le parti avait présenté la théorie de Vigier comme LA théorie matérialiste de la physique moderne, à la grande rage de la plupart des physiciens qui n'étaient pas d'accord sur le plan scientifique avec la théorie de Vigier, ce en quoi ils avaient raison, ce que je ne mesurais pas à ce moment-là. Il y avait eu des bagarres très aiguës (...) Vigier n'était pas du tout un pontife, il n'a jamais été question pour lui de présenter sa théorie, du fait qu'il était membre du comité central comme la théorie communiste de la mécanique quantique, mais les autres le percevaient comme ça. Le parti le disait.[167]

Cependant, cette explication ne tient pas au regard de la chronologie des évènements. Comme le précise Verdès-Leroux en note de bas de page, Vigier ne devient

162. Andrew Cross, «The Crisis in Physics : Dialectical Materialism and Quantum Theory», *Social Studies of Science* 21, n° 4 (1991) : 754.
163. Vigier, « Quelques problèmes physiques posés par les thèses de Lénine».
164. Jean-Pierre Vigier, «Remarques sur l'article du professeur Terletski», *La Pensée* 64 (1955) : 21-26 ; Terletski, « Le problème de la causalité en mécanique quantique».
165. Vigier, « Pour la défense de la recherche scientifique française».
166. Jean-Pierre Vigier, «Les nouvelles particules et la révolution de la microphysique», *NC* 99 (1958) : 129-134.
167. Verdès-Leroux, *Au service du Parti*, 249.

suppléant du Comité central qu'en 1959, après la mort de Frédéric Joliot-Curie dont il est pressenti pour le remplacer.[168] Entre 1955 et 1959, Vigier aurait eu en effet largement le temps d'intervenir.

8.3.4 La réouverture du débat par *la Pensée* en 1960

Après la fin de la controverse dans *la Nouvelle Critique*, c'est au tour de *la Pensée* d'ouvrir la discussion. Ce sont un total de cinq articles qui sont publiés en 1961 et 1962. Cependant, la forme adoptée diffère franchement. La principale différence est que les articles ne se répondent pas les uns les autres. Il en résulte un ton nettement moins polémique, en phase avec la ligne éditoriale plus académique de *la Pensée*. Comme l'annonce Labérenne, ces articles ont vocation à « faire le point sur les discussions qui ont lieu depuis quelques années entre partisans et adversaires de ce que l'on appelle la théorie de la double solution.»[169]

Le journal ouvre le bal du débat avec les articles de Fock[170] et de de Broglie mentionnés précédemment.[171] Fock revient en particulier sur sa visite à Copenhague de 1957 qui lui a permis, dit-il, de clarifier les points de divergence avec Bohr, notamment sur la question du déterminisme. Fock distingue deux types de déterminisme, mathématique et laplacien. Le premier se traduit par l'existence d'une solution unique aux équations différentielles. Il est donc parfaitement respecté en mécanique quantique. Par contre, ce n'est pas le cas du déterminisme laplacien qui correspond à la possibilité d'effectuer des observations avec une précision arbitrairement grande, et donc de prédire le futur avec certitude. C'est ce second déterminisme, qu'il assimile à la causalité, qui est mis à mal par la mécanique quantique.[172] L'article de de Broglie reproduit quant à lui une publication antérieure au *JPR*. Il est assez technique bien que, selon Labérenne, de « nombreuses parties soient accessibles aux profanes.»[173] En effet, comme de Broglie en est coutumier, l'article ne se restreint pas aux aspects techniques, au demeurant assez limités, et fait la part belle aux questions d'interprétation. Il se présente avant tout comme un bilan d'étape et projette les perspectives de l'ICMQ.

Les articles de Terletski[174] et de Lurçat[175] se concentrent pour leur part sur les particules élémentaires. L'article du Soviétique est assez concis, mais il aborde la théorie des particules du groupe IHP avec un ton assez favorable, qui diffère de ses critiques

168. Vigier, entretien avec Michel Pinault.
169. Paul Laberenne, «Un grand débat scientifique», *La Pensée* 91 (1960) : 7.
170. Fock, « Critique épistémologique de théories récentes».
171. de Broglie, « L'interprétation de la mécanique ondulatoire».
172. Fock, « Critique épistémologique de théories récentes», 13–14.
173. Laberenne, « Un grand débat scientifique».
174. Jakow P. Terletski, «Vers les profondeurs des particules élémentaires», *La Pensée* 95 (1961) : 29-35.
175. François Lurçat, «Réflexions sur les particules élémentaires», *La Pensée* 98 (1961) : 68-96.

passées lorsqu'il considérait, malgré une certaine sympathie pour la démarche, « peu probable que cette interprétation de la mécanique quantique puisse être acceptable » en raison de la définition du champ quantique dans l'espace de configuration.[176] Il précise qu'un argument en faveur du modèle des particules est que s'il est considéré dans une théorie non linéaire, le spectre de masse du rotateur relativiste est fini, ce qui implique un nombre fini de particules élémentaires, ce que ne prévoit pas la TQC.[177]

L'article de Lurçat est pour sa part beaucoup plus fourni et retrace pour ainsi dire l'histoire de la mécanique quantique pour aboutir aux résultats les plus récents en TQC. Lurçat choisit de ne pas entrer directement en conflit avec le groupe IHP autour de Vigier et de Broglie. Cependant, sa critique envers le rationalisme qui remonte à Descartes, « tradition particulièrement vivante en France » semble directement orientée vers l'ICMQ. Lurçat reconnait au rationalisme d'avoir « joué un rôle très important dans le développement de la science et de la philosophie en France », mais il doit être dépassé, car « il conduit parfois à rejeter les idées nouvelles au nom des anciens critères. » De plus, il précise que la clarté n'est pas un critère pertinent pour évaluer les théories puisque les théories « ne naissent pas claires, mais le deviennent plus tard, par un patient travail d'assimilation et de réexposition. »[178] Il oppose cette pensée rationaliste à celle de Langevin, dans laquelle la raison et les catégories qu'elle mobilise sont vivantes et non abstraites.

L'article de Vigier termine cette seconde phase du débat quantique ouvert par *la Pensée*.[179] Celui-ci est la version écrite d'un exposé donné dans le cadre du Centre d'études et de recherches marxistes (CERM) présidé par Roger Garaudy, professeur de philosophie. Vigier y présente la théorie des niveaux d'organisation de la Nature qu'il a élaborée avec Bohm. Il manifeste son souhait d'élargir la discussion sur les fondements de la mécanique quantique en l'inscrivant dans le cadre plus large de l'épistémologie des sciences en général. Il présente d'ailleurs la théorie des niveaux comme une tentative de poursuite des travaux engagés par Engels dans la *Dialectique de la Nature* qui prend en compte les avancées de la science depuis la fin du XIXe siècle. Un appel qui est entendu par Orcel qui mobilise la théorie des niveaux dans son champ académique, les sciences de la Terre (voir la section 5.2.3 page 164).

176. Terletski, « Le problème de la causalité en mécanique quantique », 18.
177. Terletski indique avoir calculé ce spectre à l'aide des « machines électroniques » de l'Université de Moscou. Nous n'avons pas trouvé de résultat publié, bien que Vigier et Terletski annoncent la méthode générale dans : Jean-Pierre Vigier et Jakow P. Terletski, « On the physical meaning of negatives probabilities », *JETP* 13, n° 2 (1961) : 403-412.
178. Lurçat, « Réflexions sur les particules élémentaires », 71–72.
179. Vigier, « Théorie des niveaux dialectique de la nature ».

8.3.5 La caractérisation du débat communiste : retour sur la thèse Jammer

Dans sa célèbre thèse de 1974, Max Jammer explique l'émergence d'interprétations alternatives dans l'après-guerre comme une conséquence de facteurs sociaux et politiques et cite en particulier « l'intérêt croissant pour l'idéologie marxiste en Occident ».[180] Jammer s'inspire de Paul Forman qui argumente pour sa part que les postulats de la mécanique quantique ont été d'autant plus facilement acceptés par les physiciens d'origine germanique qu'ils sont entrés en adéquation avec l'ambiance intellectuelle anti-rationaliste de la république de Weimar de l'entre-deux-guerre.[181] Parmi les interprétations hétérodoxes de la mécanique quantique, Jammer vise spécifiquement l'ICMQ qui demeure la principale alternative à l'ISMQ jusqu'à l'arrivée de l'interprétation des univers multiples de Hugh Everett en 1957 et popularisée par Bryce DeWitt dans les années 1960.[182]

Cross reprend et développe la thèse de Jammer et insiste en particulier sur le rôle du discours de Jdanov prononcé en juin 1947 devant l'assemblée de philosophes qu'il considère être la cause, directe ou indirecte, de la résurgence des débats d'après-guerre.[183] Cross analyse la « crise de la physique » principalement à travers le débat entre les communistes français. Il en conclut que sa principale caractéristique est que les différents acteurs font appel à l'expérience ou aux mathématiques uniquement par rhétorique, et, qu'en l'absence de données empiriques venant appuyer leurs arguments, sa résolution est d'autant plus difficile.[184]

La thèse de Jammer et plus spécifiquement son approfondissement par Cross appelle à plusieurs commentaires. Les aspects culturel et idéologique sont indéniablement des facteurs importants pour comprendre le renouveau de la controverse après la Seconde Guerre mondiale, mais il ne faudrait pas, selon nous, les réduire seulement au marxisme. En effet, si l'adhésion au marxisme conduit indéniablement ces physiciens à interroger les fondements de la mécanique quantique, elle ne présage pas pour autant de leurs réponses. Au cours de cette thèse, nous avons eu l'occasion d'évoquer les diverses approches des marxistes vis-à-vis de la question des fondements de la mécanique quantique. Outre celle de l'ICMQ, nous en avons identifiées quatre autres : les orthodoxes à des degrés divers comme Rosenfeld, Fock et Schönberg, l'interprétation des trois étapes de Sakata et Taketani, l'interprétation des ensembles de Blokhintzev ou encore celle des variables cachées de Terletski qui ne se confond pas avec l'ICMQ. Ain-

180. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, 250–251.
181. Forman, « Weimar culture, causality, and quantum theory : adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile environment ».
182. Stefano Osnaghi, Fábio Freitas et Olival Freire Jr., « The origin on the Everettian heresy », *Stud. Hist. Philos. Sci. B* 40, n° 2 (2009) : 97-123.
183. Cross, « The Crisis in Physics : Dialectical Materialism and Quantum Theory », 736.
184. Ibid., 754.

si, il n'existe pas de bijection entre le marxisme et une interprétation particulière de la mécanique quantique. Cette pluralité d'interprétations s'explique en premier lieu par une diversité au sein même de la philosophie marxiste qui, loin d'être unifiée, est également traversée par de vifs débats internes. Ces différents courants du marxisme sont en partie l'expression de contextes politiques et culturels nationaux, voire locaux, particuliers qui vont alors contribuer à définir les attitudes individuelles de ces physiciens relativement à la question des fondements de la mécanique quantique. En contraste avec les partisans de l'ICMQ proches du PCF, le cas de Rosenfeld, ardent défenseur de la complémentarité, farouchement anti-léniniste et parfois qualifié de trotskiste, est assez emblématique.[185] De plus, le débat entre les communistes français souligne qu'au sein d'une même famille politique il peut exister une diversité d'approches. Ceci est d'autant plus remarquable que le PCF des années 1950 est un parti dont la direction veille à maintenir une homogénéité idéologique, en particulier en ce qui concerne les intellectuels. Ainsi, pour comprendre ces divergences, il faut également regarder du côté des parcours professionnels de ces physiciens. Joyeux soulève ce point lorsqu'il reproche aux partisans de l'ICMQ d'être coupés de toute réalité empirique, enfermés dans leur tour d'ivoire à l'IHP. En schématisant, deux tendances du marxisme se dégagent du débat entre les communistes français, l'une inspirée d'un rationalisme cartésien, influencée par l'école broglienne de physique théorique, et l'autre empiriste, sous l'égide de Lurçat. Cette opposition symbolise celle entre la « vieille » physique telle que pratiquée par de Broglie et ses élèves à l'IHP et de la nouvelle représentée par Lurçat au laboratoire de physique de l'ENS.

En second point, il nous semble important de préciser que le problème des fondements possède une existence autonome, c'est-à-dire qu'il n'est pas engendré pas ces facteurs culturels, et encore moins par le jdanovisme. L'article de Cross est ambigu à ce sujet et nous considérons pour notre part que ces facteurs culturels déterminent seulement le type de réponse que les physiciens vont apporter à un problème bien réel. Les pierres d'achoppement de la théorie, principalement la mesure et la non-localité, ont traversé les différentes époques et seule la nature des réponses a changé. C'est ce qu'illustre Freire lorsqu'il isole trois principaux âges de la controverse que nous avons mentionnés en introduction de cette thèse : métaphysique (1925–1952), scientifique (1970) et transitoire entre ces deux.[186]

Concernant le rôle spécifique du discours de Jdanov dans le cadre du débat fran-

185. À ce propos, voir la célèbre anecdote de Pauli qui introduit ses lettres à Rosenfeld dans les années 1950 par « Dear $\sqrt{\text{Bohr} \times \text{Trotsky}} = \text{Rosenfeld}$ ». Anja Skaar Jacobsen, *Léon Rosenfeld : Physics, Philosophy, and Politics in the Tewentieh Century* (Singapour : World Scientific, 2012), 286 ; Cependant, bien que Rosenfeld ait personnellement rencontré Trotsky lors de la visite de ce dernier à Copenhague en 1932, il a néanmoins toujours maintenu ses distances avec le courant trotskyste en tant que tel. Jacobsen, *Léon Rosenfeld*, 98–102 et 199.

186. Freire Jr., « A Story Without an Ending : The Quantum Physics Controversy 1950–1970 ».

çais, nous pensons qu'il faut également en relativiser la portée. D'une part, les critiques de Jdanov sur le libre arbitre de l'électron sont déjà connues par les communistes depuis les années 1930. Solomon, qui est germanophone, a lu Jordan dans le texte et mentionne déjà les tendances idéalistes du physicien dans les colonnes de *la Pensée*. D'autre part, bien qu'il puisse être séduisant d'effectuer un parallèle entre la doctrine de l'existence de deux sciences et l'ICMQ qui en serait une déclinaison dans le champ de la physique, la comparaison ne tient pas. La raison la plus évidente est que l'ICMQ trouve ses racines dans les théories de la double solution et de l'onde pilote formulées par de Broglie en 1927. De plus, Jdanov ne fait pas non plus partie du corpus idéologique de Bohm en 1951 qui est avant tout influencé par ses discussions avec Einstein à Princeton. Éventuellement, les attitudes de Fer et de Halbwachs sont celles qui paraissent les plus proches de l'esprit du jdanovisme dans leur recherche d'un soutien officiel du PCF en faveur de l'ICMQ, même s'ils ne le formulent jamais aussi explicitement. Les deux physiciens tiennent des positions assez symptomatiques de la période de l'après-guerre contre l'« idéalisme » en mécanique quantique dont ils aimeraient que leur parti s'engage plus volontairement contre. Ils expriment surtout à notre sens une tendance procédurière pour régler les débats. Comme le souligne Kojevnikov, la particularité du débat de parti par rapport au débat académique est que, dans ce premier, les participants s'attendent à ce qu'une décision soit prise à la fin, selon l'adage de Lénine, « liberté dans la discussion, unité dans l'action »,[187] tandis que le débat académique ne requiert pas nécessairement de trancher entre les positions des uns et des autres.[188] Mais surtout, la controverse ne débute réellement qu'en décembre 1954, après la publication dans l'*Humanité* de l'article de Desanti encensant la thèse de Vigier. Or, à cette période, le jdanovisme et la théorie des deux sciences sont officiellement abandonnés et critiqués comme des erreurs du passé, au moins en paroles. Ainsi plutôt que d'avoir été un terreau fertile sur lequel a poussé la controverse, le jdanovisme a au contraire été un frein à la diffusion des thèses de l'ICMQ en étant agité comme un épouvantail par ses adversaires.

Enfin, une caractéristique notable du débat quantique est qu'il se déroule en dehors d'une quelconque intervention de l'autorité politique. Bien que la direction du PCF soutienne initialement Vigier, la rédaction de *la Nouvelle Critique* et donc, par extension, le bureau politique ne prend jamais position pour l'un ou pour l'autre des camps pendant toute la durée de la controverse. Ses interventions en début ou en fin d'article soulignent uniquement la volonté de poursuivre le débat en veillant à ce que chaque article de l'un soit accompagné d'une réponse de l'autre camp. Une première explication est que face à la fronde des physiciens contre l'ICMQ, la direction préfère

187. Vladimir I. Lénine, « Liberté de critique et unité d'action », in *Œuvres*, t. 10, Publié dans *la Volna* le 20 mai 1906 (1906 ; Paris : Éditions sociales, 1962), 465-467.
188. Kojevnikov, *Stalin's Great Science*, 215.

calmer le jeu. Sans doute considère-t-elle aussi ce débat sans enjeux réels et sans objectifs politiques immédiats. Le débat atteint en effet un haut niveau technique qui le rend imperméable pour les individus extérieurs au domaine. L'audience de la controverse se restreint en réalité à quelques dizaines de physiciens communistes, parisiens pour la plupart d'entre eux. À ce propos, la diffusion de *la Nouvelle Critique* est assez confidentielle et n'excède pas les 6000 numéros en 1955.[189] Il faut remarquer que tous les physiciens membres du PCF ne se sentent pas concernés par le débat quantique. Frédéric Joliot-Curie, le plus éminent d'entre eux, se tient notoirement à l'écart. Après avoir reçu la longue lettre de Schatzman critiquant la complémentarité (voir la section 2.2.1 page 63), Rosenfeld s'empresse de demander à Joliot-Curie d'intervenir afin de guérir la maladie dont sont atteints les physiciens français :

> Je crois de mon devoir de vous signaler une situation que je considère très sérieuse et qui vous touche de près. Il s'agit de vos jeunes « poulains» Vigier, Schatzman, Vassails e tutti quanti, tous jeunes gens intelligents et pleins du désir de bien faire. Malheureusement pour le moment ils sont bien malades.[...]
>
> J'ai fait ce que j'ai pu pour les repêcher. La copie-ci jointe d'un article destiné au volume qu'on prépare en l'honneur de L. de Broglie vous le montrera. J'ai pris la peine de faire explicitement l'analyse marxiste de la question et de mettre en évidence le caractère à la fois dialectique et matérialiste de la complémentarité[...]
>
> Je suis prêt à vous donner tout l'appui possible pour redresser la situation, sur la base des idées exposées dans mon article. Mais c'est à vois, mon cher Joliot, à prendre l'initiative.[190]

Dans une réponse de politesse, Joliot-Curie assure à Rosenfeld qu'il va « [s]'en occuper très sérieusement et [il le] remercie de vouloir bien [l]'aider dans cette tâche.» Cependant, il prend la défense des jeunes communistes en précisant qu'il est « d'accord avec leurs préoccupations concernant les grands principes de la physique moderne», bien qu'il concède à Rosenfeld qu'il ne suffit effectivement pas de citer et qu'il faut « comprendre le sens exact et profond avant de se lancer dans des discussions avec des citations qui ne sont que des placages trahissant parfois leurs auteurs.»[191] Sûrement que Joliot-Curie a convaincu Schatzman de s'excuser, au moins pour la forme, auprès de Rosenfeld.

Dans tous les cas, la bonne entente entre Joliot-Curie et Vigier ne pâtit pas de cet épisode. Joliot-Curie ne met d'ailleurs aucunement en doute les compétences de Vigier

189. Archives du PCF, Note sur la diffusion de « la Nouvelle Critique», 1955, Fonds Francis Cohen – La Nouvelle Critique, 1954–1994 – 354J68 : Activité/fonctionnement, 1954–1979, Archives départementales de la Seine-Saint-Denis, Bobigny.
190. Léon Rosenfeld, Léon Rosenfeld à Frédéric Joliot-Curie, 6 avril 1952, Léon Rosenfeld's papers, Niels Bohr Archives, University of Copenhagen, Copenhague.
191. Frédéric Joliot-Curie, Frédéric Joliot-Curie à Léon Rosenfeld, 21 avril 1952, Léon Rosenfeld's papers, Niels Bohr Archives, University of Copenhagen, Copenhague.

puisqu'il lui demande à l'occasion d'examiner à sa place certains des courriers scientifiques qu'il reçoit au Collège de France.[192]

D'ailleurs, Vigier n'a pas souffert politiquement d'être mis en minorité sur la question quantique. Il a pu gravir les échelons du Parti, du secrétariat de direction de la cellule du Ve arrondissement de Paris jusqu'à son élection au Comité central lors du XVe congrès du PCF en 1959. Sa rapide marginalisation dans l'appareil est également sans rapport avec le débat quantique. Vigier garde, tant en physique qu'en politique, une indépendance d'esprit et un tempérament de baroudeur. Proche de Casanova, il utilise sa position dirigeante pour infléchir comme il le peut la ligne du PCF sur la guerre d'Algérie dont il aimerait bien qu'il prenne publiquement position en faveur du Front de libération nationale (FLN), plutôt que de laisser voter ses députés les pouvoirs spéciaux à Guy Mollet. Il obtient *in extremis* en 1961 la publication d'un éditorial qu'il rédige pour l'*Humanité*[193] prenant position pour l'insoumission et pour le *Manifeste des 121*, « après avoir négocié, un jour durant, mot à mot, virgule après virgule, avec Thorez lui-même.»[194] Cet affront lui coûte cher puisque Thorez regrette finalement cette prise de position et quelques semaines plus tard, il est mis au ban avec Casanova, Servin et Robrieux. Il n'est pas reconduit au Comité central en 1961 et perd également son siège au Comité fédéral de Paris car, d'après la Section de Montée des Cadres, « son comportement politique dans les récentes discussions ne permet pas de le maintenir.»[195]

Pour autant, la frontière entre le politique et le scientifique n'est pas totalement étanche. En particulier, il nait dans le Parti une fronde anti-Vigier chez les physiciens et ceux-ci vont notoirement tenter d'exploiter sa marginalisation au sein du Comité central. Pour l'organisation de la *Semaine de la Pensée Marxiste* qui se tient à la Mutualité en décembre 1961, un témoignage d'un physicien recueilli par Verdès-Leroux relate la mission attribuée à Garaudy par la direction du PCF d'« écraser Vigier». L'objectif de la *Semaine* est pour le parti de favoriser le dialogue avec les intellectuels non marxistes dans une perspective d'ouverture. Vigier doit y intervenir aux côtés du spécialiste de Hegel Jean Hyppolite, Jean-Paul Sartre, Jean Orcel et Garaudy pour débattre du sta-

192. Frédéric Joliot-Curie, Madame la secrétaire de Frédéric Joliot-Curie à Jean-Pierre Vigier, 7 janvier 1955, Fonds Frédéric et Irène Joliot-Curie - F165, Archives du Musée Curie, Bibliothèque Nationale de France, Paris ; Frédéric Joliot-Curie, Frédéric Joliot-Curie à Jean-Pierre Vigier, 14 mars 1955, Fonds Frédéric et Irène Joliot-Curie - F165, Archives du Musée Curie, Bibliothèque Nationale de France, Paris.

193. Jean-Pierre Vigier, «Soutenir les condamnés, défendre les 121», *L'Humanité*, 3 octobre 1961,

194. L'évènement est relaté dans plusieurs ouvrages, voir : Marc Heurgon, *Histoire du P.S.U. 1 : La fondation et la guerre d'Algérie (1958–1962)* (Paris : Éditions La Découverte, 1994), 168–169 ; Jeannine Verdès-Leroux, «la guerre d'Algérie dans la trajectoire des intellectuels communistes», in *La guerre d'Algérie et les intellectuels français*, sous la dir. de Jean-Pierre Rioux et Jean-François Sirinelli (Bruxelles : Éditions Complexe, 1991), 315.

195. Archives de la section de montée des cadres, Élections des organismes fédéraux de Paris 1952–1966.

tut de la dialectique.[196] Dans les négociations avec Garaudy, les physiciens sont prêts à accepter que Vigier intervienne au nom du Parti, à condition qu'il effectue son autocritique ainsi que celle du Parti sur les erreurs passées en sciences. Vigier, amusé de la situation, en accepte le principe. Garaudy, comprenant la dangerosité de la situation notamment en présence de hauts dirigeants du Parti dont Jacques Duclos, décide finalement que les sciences ne seront pas un sujet abordé lors de la semaine.[197]

8.3.6 Épilogue à la controverse : la critique du dogmatisme par Vigier

Vigier aura l'occasion de critiquer l'attitude ancienne du PCF par un autre canal. Après son éviction du Comité central et sa marginalisation, il trouve refuge au sein de l'Union des étudiants communistes (UEC). Avec Robrieux, Halbwachs et Casanova, il « conseille» son dirigeant de la tendance « italienne» Alain Forner qui est en conflit avec la direction « stalinienne» du PCF.[198]

Cette excursion en terrain étudiant explique probablement son invitation à débattre en 1964 dans le journal *Clarté*, édité par l'UEC, aux côtés des jeunes physiciens Jean-Marc Lévy-Leblond, François Lurçat, Michel Le Bellac et Pierre Lehmann.[199] Le thème du débat porte sur le rôle du marxisme dans la physique moderne. Vigier est parmi tous les intervenants le seul à représenter une position réellement hétérodoxe en mécanique quantique. Cependant, ce débat témoigne de l'évolution de son rapport à la théorie physique au cours du temps. Lorsque la question de l'avenir de la théorie quantique se pose, entre préservation du modèle actuel ou révolution, Vigier répond tout en retenue :

> La question réelle est de savoir s'il convient en présence de la percée actuelle des expérimentateurs de rechercher une explication dans une démarche révolutionnaire ou dans le prolongement des théories actuelles. En d'autres termes, est-ce qu'on touche à une fin d'accumulation théorique ou non ?[...] Je pense comme Leblond qu'il n'apparait nulle part à l'heure actuelle d'expérience cruciale du type de celle de Michelson et Morley. On assiste plutôt, à mon avis, à une accumulation de faits qui tendent à déborder les cadres théoriques actuels. « Sortira-t-on de cette situation en les

196. Jean-Paul Sartre et al., *Marxisme Et Existentialisme : Controverse sur la dialectique* (Paris : Plon, 1962).
197. Jeannine Verdès-Leroux, *Le réveil des somnambules : Le parti communiste, les intellectuels et la culture (1956–1985)* (Paris : Fayard/Éditions de Minuit, 1987), 280.
198. Union des étudiants communistes (tendance de gauche), Communiqué, 28 février 1964, Fonds Victor Leduc (F delta res 761/2 : Victor Leduc et le PCF), Bibliothèque de documentation internationale contemporaine, Nanterre.
199. Nous tenons à remercier Jean-Marc Lévy-Leblond d'avoir aimablement porté à notre connaissance ce document et de nous en avoir communiqué une copie. Michel Le Bellac et al., «Débat. Physique moderne : que peut le marxisme ?», *Clarté* 53 (1964).

> élargissant ou en les renversant ?» est une question qui ne peut être tranchée dogmatiquement.[200]

Le changement de ton est saisissant en comparaison de ses travaux de jeunesse. Vigier était alors beaucoup plus affirmatif quant à la situation de crise dans laquelle se trouve la physique quantique. Désormais, la situation n'apparait plus aussi préoccupante puisqu'il s'agit seulement de faits qui « débordent» du cadre théorique. Cependant, le changement le plus sensible concerne le rapport entre l'idéologie et la politique. Il critique sans détour le stalinisme, contraire à la pensée de Marx et de Lénine, qui a « rompu avec la science» et a « consisté à juger les théories scientifiques concrètes en partant d'un corps d'idées philosophiques abstraites, ce qui en fait une démarche religieuse.» À travers cette dénonciation du stalinisme, il réalise en filigrane sa propre autocritique, ce que ne manque pas de relever Lévy-Leblond qui enfonce le clou :

> Vigier sera sûrement d'accord pour dire que si ses recherches se veulent guidées par le matérialisme dialectique, il n'en résulte pas automatiquement qu'elles y soient conformes (ni *a fortiori* qu'elles y soient physiquement valides).[201]

La réponse de Vigier à la remarque de Lévy-Leblond est pour le moins surprenante :

> Je suis entièrement d'accord avec Leblond. Évidemment il n'est pas question pour moi de renoncer aux idées défendues alors qu'elles trouvent leurs prolongements dans mes recherches actuelles. Ce qui est en cause c'est que les formes de l'intervention du parti en ma faveur et certaines de mes formulations étaient contraires à ce qu'aurait dû être l'intervention de communistes dans un tel débat. Le rôle du parti n'est pas de trancher entre les théories scientifiques, mais de pousser à la discussion et de soulever dans un esprit de recherche les problèmes théoriques qui surgissent du mouvement de la science et qui ne peuvent être résolus que dans le cadre de la science elle-même.[202]

Cette autocritique de Vigier marque selon nous la véritable fin de la controverse. Elle témoigne de sa mue idéologique qui s'est enclenchée lors de sa rencontre avec Bohm et son adoption de la théorie des niveaux d'organisation de la nature grâce à laquelle il a su renoncer concrètement au déterminisme laplacien, s'est ensuite poursuivie par sa reconnaissance du rôle positif et dialectique de la complémentarité de Bohr et, enfin, s'est terminée par la présente redéfinition de la relation entre le marxisme et la science.

200. Le Bellac et al., « Débat. Physique moderne : que peut le marxisme ?», 17.
201. Ibid., 39.
202. Ibid.

Conclusion

Nous arrivons au terme de cette biographie de l'ICMQ que nous avons située entre 1951 et 1964. Cette borne supérieure ne signifie pas pour autant la fin du programme, mais, par un concours de circonstances, elle correspond à un point triple, avant tout symbolique, qui marque un moment charnière dans son histoire.

Sur le plan de l'interprétation des fondements de la mécanique quantique, il s'agit de la publication par Bell de ses célèbres inégalités.[203] Bell va porter au centre du débat quantique la question de la localité en rapport avec celui de la complétude, qui était subalterne dans la réflexion des partisans de l'ICMQ. L'interprétation des inégalités en raison de leurs violations systématiques lors des expériences sera à l'origine un schisme au sein de l'ICMQ. D'un côté, certains autour de de Broglie et de Lochak contestent la portée générale du théorème. Ils considèrent qu'il ne s'applique pas à toutes les classes de théories à variables cachées, en particulier à celle de la double solution. Ils refusent d'abandonner la localité et la causalité. D'un autre côté, Vigier et Bohm prennent acte des résultats et sont prêts à renoncer à la localité pour sauver la causalité. Afin d'expliquer l'action à distance, Vigier admet, sous certaines conditions, l'existence de vitesses supérieures à celle de la lumière.[204]

Le deuxième point concerne la physique des particules avec l'arrivée du modèle des quarks de Gell-Mann et Zweig. Les quarks introduisent des changements théoriques et conceptuels importants, tels le confinement et le fractionnement de la charge. En comparaison, l'introduction des quarks est bien différente de l'ajout d'un nouveau degré de liberté, comme le spin vis-à-vis de l'équation de Schrödinger. Ainsi, le modèle des rotateurs ne peut pas être simplement ajusté afin d'intégrer ces nouveaux éléments théoriques, mais nécessite au contraire d'être repensé en profondeur. Comme nous l'avons évoqué, le programme des particules marque un net ralentissement à partir du

203. John S. Bell, « On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics », *Rev. Mod. Phys.* 38, n° 3 (1966) : 447-452 ; John S. Bell, « On the Einstein Podolsky Rosen Paradox », *Physics* 1 (1964) : 195-200 ; L'article de 1966 est en réalité, le premier rédigé par Bell mais il se perd sur les bureaux de *Reviews of Modern Physics*. Celui qui contient la célèbre preuve est celui daté de 1964, rédigé en second. Sur le contexte de publication des inégalités de Bell, voir : Kaiser, *How the Hippies Saved Physics*, 25–41 ; Freire Jr., *The Quantum Dissidents*, 235–286 ; Gilder, *The Age of Entanglement*, 237–249.

204. Eftichios Bitsakis, « Causalité et localité en microphysique », *La Pensée*, n° 235 (1983) : À propos de l'interprétation des inégalités de Bell dans le cadre de l'ICMQ, voir :

milieu des années 1960.

Enfin, le troisième point est relatif à l'engagement communiste de la majorité de ces physiciens. Nous avons évoqué le changement d'attitude de Vigier en 1964 lorsqu'il condamne explicitement le dogmatisme passé dans l'approche du PCF envers les sciences, quand bien même ce dogmatisme a pu lui être favorable. Cette critique du dogmatisme n'est à notre avis pas étrangère à sa marginalisation au sein de l'appareil qui va aller jusqu'à la rupture en 1968. Pendant la décennie, ses combats s'orientent vers l'anticolonialisme et l'anti-impérialisme, en devenant entre autres membre du Tribunal Russel. Il devient particulièrement attentif à la question vietnamienne et se lie d'amitié avec le général Giáp. Aussi, il prend très tôt part au mouvement de Mai 68 et devient le coordinateur du journal *Action*, organe des Comités d'action qui rassemblent les principales organisations étudiantes comme Union nationale des étudiants de France (UNEF), la Jeunesse communiste révolutionnaire (JCR), et le Mouvement du 22 Mars. Il se rapproche à cette période du trotskiste Alain Krivine, exclu de l'UEC et fondateur la JCR.[205] Ces accointances avec les « gauchistes» lui valent son exclusion du PCF. Parmi les physiciens de sa génération, ce n'est pas le seul à rompre avec le Parti. Entre autres, Schatzman le quitte en 1959, sans pour autant renier le marxisme, et Vassails peu après 1956. Dès lors, il conviendrait d'étudier les mutations du discours sur les sciences de ces physiciens après leur départ, volontaire ou forcé, du PCF.

Avec l'ICMQ en tant que médium, nous avons éclairé au cours de cette thèse les parcours de physiciens provenant d'horizons divers, mais qui partagent une vision réaliste des théories physiques qu'ils intègrent dans leur travail quotidien. En particulier pour les marxistes qui sont majoritaires au sein de ce groupe, nous avons explicité une démarche conceptuelle intégrée entre science, philosophie et politique qui, dans leur esprit, forment un tout inséparable, mais qui, paradoxalement, ne peuvent pas se déployer de manière permanente en raison de diverses contraintes institutionnelles, politiques, sociales et scientifiques. Chaque activité a tendance à prendre place dans un espace spécifique. Le lieu privilégié de la pratique scientifique est le laboratoire, tandis que celui de la politique est le PCF. Par exemple, nous avons constaté que la condition tacite de bonne cohabitation entre les communistes de l'IHP et de Broglie était de laisser tout discours politique sur le seuil d'entrée de l'IHP. Chez certains physiciens communistes, comme Francis Fer, cette séparation est même revendiquée. Toutefois, nous avons pu identifier des cas concrets où l'utilisation consciente de la dialectique matérialiste a guidé le travail théorique de ces physiciens. L'exemple le plus emblématique est sans conteste la théorie des niveaux d'organisation de la nature et son application dans la démonstration de la règle de Born par Bohm et Vigier. La thèse de Vigier intègre également une dialectique des lois physiques en proposant une synthèse entre l'onde et le corpuscule par le champ à singularité qui illustre l'unité des contraires dans

205. Bernard Brillant, *Les clercs de 68* (Paris : Presses Universitaires de France, 2003), 285.

leur dépassement. Ainsi, malgré un cloisonnement fonctionnel, il faut tout de même voir dans cette production théorique des physiciens de l'IHP du politique et de l'idéologique.

Dans une certaine mesure, nous avons nous-mêmes reproduit ce cloisonnement relatif entre la science, l'idéologie et la philosophie au cours de notre narration, sans être dans la capacité de traiter ces différentes composantes d'un bloc. Des connexions entre ces différents aspects ont bien entendu été réalisées, mais la plupart du temps elles n'ont pu l'être qu'*a posteriori*, une fois l'exégèse du contenu scientifique accomplie, reproduisant d'une certaine manière la dichotomie entre le formalisme théorique et son interprétation. Ceci soulève un point méthodologique sur la façon d'aborder la relation entre science et idéologie en histoire des sciences. Il est à notre sens difficile, sinon impossible, de proposer une réponse universelle. En effet, cette relation s'exprime selon des modalités différentes en fonction des disciplines et des spécialités ainsi que des époques. Dans notre exemple, les physiciens mobilisent la dialectique matérialiste dans la production théorique qui guide leur démarche. Mais, pour prendre un autre exemple issu de la physique, il n'en est pas ainsi chez Frédéric Joliot-Curie, dont la préoccupation est avant tout l'utilisation sociale de l'atome et sa désapprobation en tant que technologie militaire dans la perspective d'un projet de société émancipateur.[206] Chez les partisans de l'ICMQ, cette dimension sociale des produits de leurs recherches est absente, ce qui s'explique aisément par la nature des travaux enjeux éloignée des applications technologiques et industrielles. Dans un dernier exemple tiré de cette fois-ci de la biologie, John Burdon Sanderson Haldane réunit pour sa part ces deux aspects, par une effectivité de la dialectique matérialiste dans son travail de recherche en génétique des populations et dans la perspective d'un projet de société global, entre autres à travers l'eugénisme.[207]

Un second point méthodologique qui a émergé au cours de cette thèse concerne le traitement des théories minoritaires en histoire des sciences. En introduction de cette thèse, nous nous demandions dans quelle mesure il serait possible de construire notre narration en faisant *comme si* l'ICMQ évoluait dans le courant dominant de la physique. Il s'agissait pour nous d'une posture méthodologique qui visait consciemment à ne pas aborder notre sujet à travers le prisme de la théorie marginale. Nous avions souligné les limites de l'application rigoureuse d'une telle posture, en partie pour des raisons épistémologiques. Cette neutralité ne doit à l'évidence pas se transformer en œillères et il est à l'évidence impossible de faire entièrement abstraction du fait que nous avons affaire à un groupe en marge du courant dominant de la physique. Le second questionnement soulevé par la marginalité est en rapport avec la disponibilité des sources qui interroge concrètement de la possibilité d'écrire une histoire des « vaincus», ou

206. Voir à ce propos la biographie de référence Pinault, *Frédéric Joliot-Curie*.
207. Gouz, *J.B.S. Haldane, la science et le marxisme*.

plus généralement des travaux qui n'ont pas su trouver de postérité. En grossissant le trait, alors que le geste de préservation et de sauvegarde des archives parait évident pour un chercheur ayant reçu un prix Nobel, il l'est beaucoup moins pour celui dont les travaux n'ont pas connu une telle reconnaissance par les pairs et qui rejoindra la grande masse des chercheurs oubliés par l'histoire. Dans notre cas, notons qu'au sein même du groupe IHP, la disponibilité des archives est inégale et variable. Elles sont quasiment inexistantes pour Vigier, mais très abondantes concernant Schatzman et Bohm. Schatzman a en effet joué un rôle de premier plan en astrophysique. Bohm est de son côté reconnu comme le père des variables cachées et il a par ailleurs contribué à la science « normale », entre autres en physique des plasmas et par la découverte de l'effet Aharonov-Bohm qui met en évidence l'impact du potentiel vecteur sur les trajectoires des particules chargées. Ainsi, ces chercheurs disposent de leurs propres fonds, respectivement à l'Observatoire de Paris et au Birkbeck College de Londres. Vigier, qui est pourtant notre principal protagoniste, a ainsi dû être considéré par l'intermédiaire d'archives de tierces personnes, principalement celles de Schatzman. Nous avons ainsi été contraints d'inférer certaines de ses prises de position, avec comme postulat qu'il s'exprimait à l'unisson avec Schatzman dans la correspondance avec Bohm. Cette hypothèse nous a semblé plausible au regard du contenu de cette correspondance qui indique que les deux physiciens sont intellectuellement en phase et entretiennent une réelle relation d'amitié. Mais il s'agit d'une approximation dont la validité est nécessairement relative. Sans nul doute, la correspondance entre Bohm et Vigier nous aurait permis d'envisager les relations entre les membres du groupe avec plus de reliefs et nous aurait révélé certains angles morts de notre étude. Ainsi, notre histoire est condamnée à être lacunaire et il faut alors garder à l'esprit que l'abord d'un objet historique est en partie tributaire du matériau de base disponible. Il ne s'agit pas de défendre une posture positiviste qui affirmerait que le travail d'historien consisterait essentiellement à compiler la plus grande quantité possible de documents. L'historien doit nécessairement sélectionner et interroger ses sources en fonction de sa problématique et du courant de pensée auquel il se rattache. Néanmoins, il faut penser dialectiquement le rapport entre la démarche méthodologie particulière et le matériau. Dans notre cas, une dimension sociologique, centrée sur les interactions entre les différents membres du groupe IHP aurait eu toute sa place. Malheureusement, les sources à notre disposition ne nous ont pas autorisé une telle approche. Nous avons donc été amenés à adapter notre questionnement. Ainsi, ce cas d'étude illustre que la nature des sources oriente sinon conditionne le type de questions qu'il est permis de poser.

Enfin, nous pouvons terminer par quelques pistes de recherches qui nous ont été suggérées au cours des développements de cette thèse. La première piste concerne la collaboration avec les physiciens japonais qui mériterait d'être approfondie. En particulier, nous avons constaté que les contributions originales de Takehiko Takabayasi

ont été d'une grande importance pour Bohm et Vigier, tant sur le plan de la théorie que sur celui de l'interprétation. Or, leur prise en compte a été très limitée puisque la majorité des écrits de Takabayasi à propos de l'interprétation de la mécanique quantique sont en japonais. Nous avons été privés de leur prise en compte dans notre travail, alors qu'ils auraient indéniablement permis à notre analyse de gagner en épaisseur. Toujours en relation avec la physique japonaise, le séjour de recherche de Vigier à Kyoto n'a pas été suffisamment documenté et des zones d'ombre demeurent. Malgré un début de collaboration avec Yukawa, celle-ci ne s'est pas inscrite dans la durée. Ceci est probablement imputable à l'échec du programme en physique des particules, mais rien n'aurait interdit que des liens perdurent grâce à d'autres collaborations ultérieures. Il nous faut mentionner que nous nous sommes heurtés au cours de notre travail à un manque général, dans la littérature anglophone, de travaux historiques à propos de la physique japonaise et de ses acteurs. La lacune la plus manifeste est certainement l'absence d'une biographie de référence de Yukawa.[208]

Toujours à propos des connexions internationales du groupe IHP, celle avec les Soviétiques mériterait également d'être étudiée plus attentivement. En particulier, certains Soviétiques comme Fock et Terletski ont séjourné à Paris. Vigier s'est lui-même rendu en URSS, et l'ICMQ y a été discutée par les universitaires. Toujours à propos des liens de Vigier avec l'URSS, il conviendrait d'éclaircir le mystère quant à sa participation ou non au réseau d'espionnage soviétique pendant la Guerre froide.

Une troisième et dernière piste nous est suggérée par un échange avec Flavio del Santo de l'université de Vienne concernant une comparaison possible entre différents groupes de physiciens qui ont émergé pendant la seconde moitié du XXe siècle et qui se sont intéressés aux fondements de la mécanique quantique : le groupe IHP, le groupe des physiciens italiens dans les années 1970 sous l'impulsion de Franco Selleri,[209] et le Fundamental Fysiks Group à Berkeley fondé en 1975 par Elizabeth Rauscher et George Weissmann.[210] Outre leur intérêt pour les fondements de la mécanique quantique, ces trois groupes partagent le fait d'être influencés par la contreculture de leur époque : celle du PCF pour le groupe IHP, l'*Autunno caldo* italien de 1969 et la culture New Age avec le mouvement hippie aux États-Unis. La thèse défendue est que ces toiles de fond culturelles ont orienté la manière d'aborder les fondements de la mécanique quantique. Le groupe IHP s'est davantage porté sur les questions épistémologiques par la problématique de l'objectivité et du déterminisme, car il correspond à une

208. Yukawa a rédigé son autobiographie en 1957, traduite en français, mais elle s'arrête en 1935 lorsque le physicien publie son premier article sur le méson. Hideki Yukawa, *L'itinéraire intellectuel d'un physicien japonais : Tabibito : le voyageur* (Paris : Belin).

209. Pour le contexte italien, voir : Freire Jr., *The Quantum Dissidents*, 197–233 ; Angelo Baracca, Silvio Bergia et Flavio Del Santo, « The origins of the research on the foundations of quantum mechanics (and other critical activities) in italy during the 1970s », *arXiv.org*, 2016, https://arxiv.org/abs/1608.05197.

210. Le Fundamental Fysiks Group est l'objet de l'ouvrage : Kaiser, *How the Hippies Saved Physics*.

certaine forme du marxisme telle que théorisée par le PCF. Les Italiens sont pour leur part préoccupés par la relation entre science et société, l'objectivité de la science pure, la relation entre la politique, l'économie et une critique générale du scientisme qui s'inscrit dans le mouvement de contestation sociale et de grèves massives qui traverse toute l'Europe à la fin des années 1960. Le Fundamental Fysiks Group s'est quant à lui penché sur la non-localité et la relation entre la physique et la conscience, avec comme toile de fond le mysticisme et la prise de substances psychédéliques.

Annexes

Annexe A

Archives

A.1 Correspondance

Les annexes qui suivent sont les transcriptions de la correspondance non publiée utilisée au cours de la thèse (se reporter à la bibliographie finale pour les références complètes). Les documents sont présentés par ordre chronologique car il nous semble être un ordre plus naturel plutôt que par auteur. À plusieurs reprises, nous ne sommes pas parvenus à déchiffrer certains mots pour différentes raisons (écriture de l'auteur, mauvaise qualité de nos reproductions, etc.). Le cas échéant, ces mots sont remplacés par des symboles « [?] ».

A.1.1 | Évry Schatzman à Léon Rosenfeld (17 juin 1950)

Institut d'Astrophysique
98 bis Bd Arago Paris 14°

17 Juin 1950

Cher Monsieur,

Croyez bien que ce n'est pas sans émotion que j'ai reçu la lettre de Monsieur Blackett : une telle proposition, engageant tout mon avenir est la marque d'une confiance qui me touche profondément. L'idée de travailler à Manchester en liaison avec M. Blackett et avec vous m'a fait rêver. J'avais un peu l'impression de voir s'ouvrir à moi des conditions exceptionnelles de travail au milieu de physiciens parmi les plus éminents du monde entier. Il m'a fallu plusieurs jours pour commencer à envisager de sang froid les innombrables questions qui étaient ainsi soulevées.

Pour m'aider à les examiner, je serais heureux s'il vous était possible de m'adresser quelques précisions sur cette chaire.

Pour vous permettre d'apprécier quelles difficultés se présentent je me permets de vous les résumer ici.

Il ya certains engagements vieux de plusieurs mois. J'avais promis à M. Danjon, Directeur de l'Observatoire de Paris, de faire des conférences d'Astrophysique pour le certificat d'Astronomie et je m'étais engagé de façon analogue pour la même période de temps, envers l'Université Libre de Bruxelles.

Mises à part certaines difficultés d'ordre familial, les lien que j'ai avec les étudiants que j'ai formés ou que je suis en train de former, la reconnaissance que je dois aux astronomes et astrophysiciens français pour m'avoir sauvé la vie en 1943-1944, m'attachent profondément à la France. Enfin, je peux vous dire, mais à vous seul, je tiens beaucoup à mon activité sociale, et, à l'étranger, même au sein d'un milieu aussi sympathique que peut l'être celui où se trouvent M. Blackett et vous même, par respect pour le pays qui m'abriterait, je ne pourrais envisager de la continuer.

Espérant que vous me pardonnerez de vous donner tous ces détails, et souhaitant avoir bientôt le plaisir de vous lire, je vous prie de croire à mes sentiments les plus sincères.

A.1.2 | David Bohm à Évry Schatzman (1951 - non datée)

Dr. Evry Schatzman
101 Rue de Miromesnil
Paris, France

Dear Dr. Schatzman

On the suggestion of Dr. Jules Charney, I am writing you about the theory of Vigier and Renier. I have sent you (also Renier) a copy of my manuscript on « a suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of Hidden Variables » which will be published in the Dec 15. issue of Physical Review. I have heard also that de Broglie has recently published an article on the subject, which I have not yet had time to read. I recently received a letter from de Broglie, in which he took great pains to claim credit for the ideas. My answer to him was to admit that he suggested the method in 1926, but to point out that because he did not carry it to its logical conclusion he came to the erroneous conclusion that the idea does not work. On the other hand, the main new element added by me is to show in detail (especially constructing a theory of measurements) that this interpretation leads to all of the experimental predictions given by the usual interpretation. I should add that in the version to be published in the Phys. Rev., the relation to de Broglie's work is brought out more clearly than in the mimeographed notes that I am sending you. There is one other point added in the published paper and not in the notes. This is a demonstration that von Neumann's proof that quantum theory is inconsistent with hidden variables is wrong. The principal error arises in an implicit assumption made by von Neumann, that the hidden variables must be only in the observed system and not in the measuring apparatus. In my interpretation, the hidden variables are in both the observed system and in the measuring apparatus. Thus, my interpretation goes beyond the scope of von Neumann's theorem although I have not personally talked with von Neumann about this, I have heard indirectly that he admits the truth of my argument also he came to a talk given by me, and made no objections.

I wish that you would show this letter to Vigier and Renier. I am very much interested in their theory connecting Einstein's general relativity with quantum theory. I would very much like to get a copy of their work. I am however now going to teach in Brazil and all communications should be addressed to :

Dept de Fisica
Universidade de São Paulo
São Paulo, Brazil

It is possible that I may be able to visit Europe this winter in which case it would be very nice to discuss these problems in detail. as you may know, my position in these

physical questions is that the world along with all observers who are part of it is objectively real and in principle precisely definable (with arbitrarily high accuracy), and subject to precise causal laws that apply in each individual case and not only statistically. However, there are probably an infinite numbers of levels of reality, so that a complete theory will never be obtained. This matter is made of atoms, atoms of electrons proton, neutrons, etc. and electrons, protons etc. are in turn made of some still more fine-grained material basis which has not yet been detected, and so on and infinitum Because of the infinite numbers of levels, the existing at a particular level (as well as the laws that apply to these things) may undergo qualitative change when material conditions change appropriately. Thus, although the universe is in principle completely determinate, in practice, we must consider only a finite number of levels, and thus be confronted with the appearance of qualitatively new phenomena, which are determined by underlying laws, but which are still not in practice predicted in advance.

With regard to people like de Broglie who had the idea for a similar interpretation of quantum theory, my attitude is that if a man finds a diamond and not realizing its value throws it away, then the stone belongs to the first person who finds it again and does realize its value.

Sincerely
D. Bohm

A.1.3 | Max Born à Jack Brimble (14 mars 1951)

For The Attention of Mr. Brimble.

14th, 1951.

The Editors of « Nature»
Messrs Mcmillan & Co. Ltd.
St. Martin's Street,
LONDON, W.C.2.

Dear Mr. Brimble,

May I ask your help in the following matter.

There has recently appeared a book by Louis de Broglie « Optique Eletronique et Corpusculaire», in which he says in the Preface that he has used several books, amongst which is my own big German test book on Optics. We are just ar present preparing a new version of this book in English, and on this occasion, one of my collaborators discovered that de Broglie ha not only used my book throughout, but translated whole sections, word by word, using the same formulae and figures with hardly any change. The corresponding pages are : It may be regarded as an honour for me, that he could

L. de broglie	M. Born
pages 150–159	pages 68–77
159–164	85–90
169	92

not express his ideas better than I had done, but on the other hand, I think it is against all decency to copy a text, even in a translation, without quoting the origin.

Now, I have the impression that no review of this book has appeared yet in « Nature.» If that is so, would you kindly inform the referee whom you have chosen (for I am sure there will be a review) about this matter, and ask him to mention it with an appropriate comment.

I am keen on this matter because my German book has had a very bad fate anyhow. I finished it just as Hitler came to power, and i received anly one-third of my royalties, as I had to leave Germany, and the rest could not be transferred. The book, amongst others by refugee scholars, was hardly sold in Germany. After the war the Americans confiscated this as the property of Springer, and it is now in the hands of the Custodian of Alien Property. They have sold the right of publication to an American firm, Edwards Bros., Ann Arbor, who sell it in great numbers with the help of a photo-technical process. I have sent in my claims years ago, but never got any other reply than that the matter will be considered in due course, when they have concluded e peaceful settlement with Germany – which will be long after my death.This state of

affairs is the reason why the new and improved English version is now in preparation. You can imagine my wrath when I now see that its is plundered by other people, like de Broglie, who really have no need to do such things.

With kind regards,
Yours sincerely

A.1.4 | Évry Schatzman à David Bohm (3 décembre 1951)

Dr. D. Bohm
Dept de Fisica
Universidade de São Paulo
São Paulo, Brazil

Dec. 3^d 1951

Dear Dr. Bohm,

Your recent letter was an excellent one, and I showed it heartily to Vigier and Reignier. We completely agree with your philosophical point of view. Any physical theory should be completely deterministic, because an affirmation of the dialectical materialism is that there is an objective reality and that this reality is cognizable, that we can built an image of that reality in our mind. All the physical theories, but the quantum theory, are built on such implicit assumptions. We should be grateful to people like Vigier, like you, who have with tenacity devoted their efforts to the rebuilding of the quantum theory on its feet, just like the dialectic of Hegel, which had to be put back on its feet !

All of that is just to say that we must be very confident in the old idea of determinism, even if our measurements are only the result of our ignorance of hidden variable.

As you probably know, already, an important result of Vigier is that particles, singularities of the field in Schrödinger theory, must follow the lines of currents of the field. Consequently, if we [?], for the field :

$$\psi = ae^{i\frac{\theta}{\hbar}}$$

and for the wave of probability

$$\phi = be^{i\frac{S}{\hbar}}$$

We must have

$$S \equiv \theta$$

That property of the quantum field was not known of L. de Broglie in 1927, and was one of the main difficulties he could not overcome. Consequently, Régnier, Schatzman and Vigier have demonstrated that after any time, as a consequence of the interaction of the field with the particle, both having an infinite number of degrees of freedom, there would be an equipartition of energy between the field and the particle, tue consequence of which is that

$$b \sim a$$

(a paper will soon appear on that point)[1] We are working out now an improvement of your remarkable theory of measurements. But, on the other hand, we try to make a theory of electron magnetism, in order to find on ne side, which trajectory does follow charged particles, on the other side, the structure of photons. Naturally, we'll let you know how advanced is that work. I personally quite understand how depressing it might be of being so much isolated as you are.[2]

With my best wishes,

Sincerely
Evry Schatzman

1. Régnier, Schatzman et Vigier, « Sur la répartition statistique des mouvements des particules en Mécanique quantique ».

2. La lettre est non datée, mais son envoi peut être estimé entre le 17 septembre 1951, date de publication de l'article de Louis de Broglie en réponse à la théorie de David Bohm mentionné dans la lettre et le 10 octobre 1951, date à laquelle David Bohm part au Brésil.

A.1.5 | Évry Schatzman à David Bohm (20 février 1952)

Dear Dr Bohm,

It took some time to answer your fascinating letter, just as I was preparing that paper for « La Pensée ». That paper is being typed now and I hope it might be possible to have a print for you. I am sure you will excuse me for having [?] used some of your published works, such as your beautiful book on Quantum Mechanics. Sorry am I, I did not meet you in 1948-1949 when I was in Princeton !

I am quite sure that very little change would make it possible to transform your book in a really naturalistic description of quantum mechanics. I personally appreciated your description of EPR experiment.

But now, I would say that neither Jean-Pierre Vigier, nor I, did understand at all your appendix A about quantum theory of radiation ? Should we think that only fields in real space does exist, then your super quantum real field seems inunderstandable. That such quantities like phase velocity might have any value seems reasonable but we do not understand of which kind is the propagation of the super field as it seems to propagate in configuration space (abstract space built on the qk of the electromagnetic field).

Actually we turn more and more towards the study of singularities of the field, more or less in line of Einstein's views (for instance in Annals of Mathematics, 1939, 1941), and we have not yet calculated the possibility that the photon might be a singularity of the [?].

Thus, Schrödinger equation (or its relativistic equivalent !) is not a field equation. The Ψ is not the real field. It is only an auxiliary equation describing the motion of particles. Particles are naturally not the material points moving in empty space of the classical mechanics, but are singularity of a real field. At distance of the electron, we can distinguished between the electromagnetic field, the gravitational field and the quantum field, the last decreasing quickly with the distance, the second is playing a rôle only in the interior of the particle. But we have not yet succeeded in writing the equations of motion of many particles. As you know, it is not possible of forming a relativistic Lagrangian for many particles, but only equations of motion. Consequently, the right way seems to try to obtain the Schrödinger equation for many particles, not directly, but through the intermediary of the equations of motion, and to show that these equations of motion derive of a unique equation of Jacobi. In that sense, you see that we come back to the deep remarks of Einstein concerning quantum mechanics is not complete, in that sense that the formalism does not contain the particle. We have all the possible trajectories of the particles by integrating

$$\boldsymbol{v} = -\frac{1}{m}\boldsymbol{\nabla}_S$$

but the particle is still the classical particle, but now moving in a filled space, filled with a field which we have not yet described ! That field fills all space, and the particle moves in it, the particle considered like a singularity. As you probably know, Einstein has shown that the field equation $R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}R = T_{ik}$ leads for charged particles considered as particles as singularities of the electric field and of the gravitational field, to the equation of motion

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = \text{Lorentz Force}$$

Proceeding in that way, we expect to find <u>what</u> is in between the particles, which field is actually present.

Giving on to the next approximation, we hope it will possible to write the non linear terms in the equation of motion, and to obtain, for instance, the non linear approximation of the Schrödinger equation.

As you see, that way of approach is very [?] different of yours. We may be wrong, bu we do not agree at all with your ideas about the different levels od reality. It seems to us that it is a formal interpretation of the famous sentence of Lenin, in Materialism and Empiriocriticism, about the different levels of reality. First of all, the number of elementary particles way will be infinite but most of them being unstable. We think that the study of the stability of the structure of elementary particles must lead to a mass spectrum.

Naturally, it is quite possible that in the microsystems the velocity of light is no more a limit, which cannot be overcomen. It is possible for instance, that the very processus of radiation, by which an electron leaves a photon, implies over a very short distance, a velocity greater than light velocity.All of that will come out, we expect, of the theory.

The analogy, with plasma oscillations seems to be interesting, but not to be conducted too far. I have studied your paper (Bohm and Gross) in Phys. Rev. (actually, there are a fewer prints that I did not [?]. I will write to you some day about these !) Naturally, there is notihing about a continuum of « electrons» for instance. Naturally all of that is possible. But it seems that, in the <u>actual status</u> of the theory, our hope is a deepening of relativistic theories.

Compare with atomic theory, there was all chemical facts, such as the law of combining in definite proportion in support of the theory. THe atoms had already appeared as units of matter, and the ratios of the masses were known long before the proof of the existence of the atoms was given. As yet, we do not have any indication of such a sublevel. We do not know any possible division of the electron - on the contrary there are a number of evidence - for an infinite number of elementary particles. Should we considered[?], one day, why matter appears in particles, we should have to investigate

their structure. We do not yes know what happens inside a radius of 10^{-13} cm. But the « gravitationnal» radius of a particle is 10^{-55} cm and, considering the ds^2 of an isolated particle, their is an infinite path to that gravitational radius.

Now I should leave you. I shall soon write about your description of a Dirac electron, which seems very interesting and [?]

Sincerely yours
Evry

E. Schatzman
101 Rue Miromesnil
Paris 8e

A.1.6 | Évry Schatzman à Léon Rosenfeld (30 mars 1952)

Cher ami,

J'ai reçu avant hier votre article sur la complémentarité. Avant même de vous répondre en détail et de façon murement réfléchie, je voudrais vous faire part de mes réflexions au cours de la lecture. Excusez donc le décousu de ces réflexions, elles ne sont pas le fruit d'un bel arbre bien taillé, mais plutôt de baies sauvages cueillies sur des ronces. En vérité, il y a une part de réflexion tout de même, puisque je suis en train de préparer un long article pour la Pensée sur la mécanique quantique. Sans doute, je ne saurais me vanter d'autant de pénétration que vous puisque je ne suis qu'un amateur en ce domaine, et des choses évidentes pour le non spécialiste ne le sont pas pour le spécialiste et vice versa. Mais puisque vous posez la question sur le terrain de la théorie de la connaissance, he crois ne pas être trop prétentieux en esquissant une réponse.

Tout d'abord, il est certain que les expériences hypothétiques, telles que le microscope d'Heisenberg, les expériences d'interférences, etc ... ne sauraient être mises en doute. Les expériences réelles qui leur correspondent, effet photoélectrique et effet Compton, diffraction des électrons par un cristal sont la manifestation d'une réalité qu'il nous faut décrire. Il nous faut rechercher quelle est la réalité sous jacente aux faits observés, il nous faut nous faire une représentation dans notre cerveau de cette réalité sous jacente, et la preuve de cette réalité se trouvera dans la pratique, pas seulement dans la confrontation avec l'expérience, qui n'est qu'une simple confrontation avec des phénomènes connus, mais la réalisation d'expériences nouvelles. Or je ne crois pas qu'il soit correct de dire (p 2) que ce soit « sur le plan de l'expérience et de son interprétation immédiate qu'il convient de juger si les conceptions nouvelles remplissent adéquatement leur fonction» car les expériences décrites sont des expériences telles que la théorie actuelle nous permet d'en imaginer, ce sont des expériences hypothétiques, toutes les expériences réelles mettant en jeu des ensembles de micro-objets.

Considérons en effet la diffraction des électrons un par un. Lorsqu'un électron est diffracté par un cristal, et que le phénomène objectivement réel de diffraction s'est produit et que l'électron est venu révéler un grain d'argent sur une plaque photographique, on n'observe évidemment pas d'interférences, on observe qu'un seul grain d'argent sur la plaque photographique. Dans ce phénomène, l'électron, objet matériel, ayant une existence objective, est passé d'une source d'électrons à la plaque photographique en passant par le cristal qui est sur son chemin, a subi des interactions complexes avec les champs électriques des atomes du cristal. Tout le monde est d'accord sur l'existence objectivement réelle de l'électron, en tant qu'objet portant une charge électrique $-e$, de dimensions très petites, puisque l'action en $1/r$ se manifeste sans changements appréciables jusqu'à de très petites valeur de r, de l'ordre de 10^{-13}cm. Le caractère ondulatoire des propriétés de l'électron ne se manifeste pas à nous dans cette expérience

faite sur une particule individuelle. Cependant, les phénomènes qui se produisent dans cette expérience faite sur une particule individuelle ont une existence objective réelle, en dehors de notre esprit. Nous devons donc être capables de faire une théorie qui nous permette de nous représenter un tel phénomène objectivement réel, c'est là un point de vue fondamental en théorie de la connaissance chez les marxistes. Or, dans les conceptions de Bohr, il est impossible en principe de procéder à la description du phénomène individuel. Vous le dites vous même (p3) : « L'existence du quantum d'action ... impose une limite à l'analyse de l'interaction entre le système et l'appareillage qui fixe les circonstances dans lesquelles nous l'observons ». C'est une attitude que je ne crois pas juste. Je ne mets pas en cause l'extraordinaire efficacité de la mécanique quantique pour décrire les propriétés statistiques des ensembles de microsystèmes, mais le postulat qu'il existe une réalité inaccessible par principe. La distinction entre système étudié et moyens d'observation n'a rien à faire ici. Il s'agit seulement de savoir si ce phénomène microscopique individuel, ayant une réalité objective, pourra être représenté par notre cerveau, ou si nous décrétons que cela est impossible. S'il est impossible par principe de décrire les phénomènes individuels, alors il nous faut recourir à des descriptions statistiques, mais il faut remarquer que ces lois statistiques sont déterminées, que leur évolution dans l'interaction des systèmes évolue de façon déterministe, causale. Le phénomène d'interférences ne se manifeste que lorsqu'un nombre assez grand d'électrons a traversé le cristal, assez grand pour que de simples fluctuations accidentelles dans le nombre d'électrons par unité de surface sur la plaque photographique ne masque pas le phénomène des variations régulières de cette densité dues à la diffractions. C'est pourquoi je ne comprend pas votre phrase (p5) : « Assurément, puisque la notion de probabilité se réfère essentiellement au degré de connaissance que nous avons d'un phénomène, elle ne saurait selon des conceptions classiques, entrer d'une manière fondamentale dans la formulation d'une loi naturelle qui prétent décrire comment le phénomène se déroule indépendamment de notre observation ». En effet, la loi de Maxwell, description statistique des propriétés des gaz, est une loi statistique, et elle existe indépendamment des conditions d'observations et en général en dehors de tout observateur, par exemple dans le soleil. (bien que, en vérité, la loi de Maxwell ne soit qu'un concept, et que jamais en toute rigueur, ne se trouvent réunies dans la nature les conditions d'équilibre nécessaires à l'existence d'une répartition des vitesses, en raison de l'existence toujours et partout de flux). Vous dites ensuite « Mais nous venons de voir qu'en physique quantique cette prétention devient illusoire : la définition même des phénomènes doit spécifier les circonstances de l'observation. » Ce qui revient à dire, si je comprend bien, que la spécification du phénomène individuel est impossible, que sa description est impossible. C'est cela qui me semble profondément faux dans la conception de Bohr.

je voudrais donner encore un exemple de processus individuels dont on ne donne

actuellement aucune représentation : le rayonnement s'effectue naturellement sous la forme de raies d'émissions, par exemple. Je m'étais posé la question de savoir si, lorsque deux atomes émettent la même raie, mais l'un avec une durée de vie de 10 ans et l'autre avec une durée de vie de $^{-8}$ secondes, si les photons émis étaient différents, ou si les propriétés statistiques des ensembles des photons émis étaient différentes. Je suis convaincu, après réflexion que ce sont les ensembles statistiques qui diffèrent et non les pas les photons émis. J'indique en passant que l'expérience de Vavilov, qui consiste à observer les fluctuations indépendantes dans l'intensité des anneaux de Newton produits avec un rayonnement de très faible intensité me semble bien prouver que chaque photon possède des propriétés individuelles telles que les ensembles statistiques de photon montrent ce qui l'on appelle des propriétés ondulatoires. Pour en revenir aux propriétés des photons, nous devons bien admette que les processus individuels d'émission des photons ont une réalité objective. À travers des différences quantitatives différentes, ils présentent des propriétés qualitatives communes. Il ne me semble que l'on devrait arriver à décrire le processus individuel même de production des photons, et qu'en tout cas un tel processus n'est pas inconnaissable par principe.

Mais je voudrais indiquer encore un certain nombre de phénomènes, qui reçoivent bien entendu une interprétation par Bohr, mais qui me semblent en contradiction avec cette interprétation elle même. Tout d'abord, il y a les phénomènes de conservation que l'on considère s'appliquer aux phénomènes individuels, conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement, du moment de quantité de mouvement. Il y aussi les phénomènes qui apparaissent en théorie de l'électron. On considère en effet dans ces théories les propriétés du « vide» au voisinage de l'électron, la présence de l'électron introduisant une perturbation dans la « distribution de charge» du vide. Il en est de même avec la densité de charge induite par le proton, et qui est infinie dans les théories actuelles. Dans ces théories, on parle explicitement de la position de l'électron. Peut être est-ce ignorance ou naïveté de ma part, mais, puisque l'on parle de position de l'électron, c'est que cette position existe objectivement en dehors de la mesure.

Je voudrais maintenant passer à une question d'une autre nature, c'est l'interprétation dialectique que vous faites de la théorie de Bohr.

Tout d'abord, je voudrais faire une distinction qui n'est en tous cas pas claire dans votre texte entre la dialectique de la nature et le mouvement dialectique de la pensée. Du point de vue du marxiste, la dialectique c'est suivant le mot de Lénine, La recherche des contradictions dans l'essence des choses. C'est par cette recherche des contradictions que progresse la connaissance scientifique. Ce n'est pas en effaçant les contradictions, mais en en recherchant les racines profondes pour les résoudre que progresse la science. Or les contradictions entre la théorie quantique sous sa forme actuelle et les faits d'observation sont innombrables : divergences inexpliquées, interactions entre particules d'espèce différente grossièrement fausses, et, depuis les dé-

buts de la mécanique ondulatoire, contradiction entre les phénomènes individuels et la description statistique des ensembles de phénomènes individuels. Il faut prendre conscience de ces contradictions, les considérer comme des défauts essentiels des théories actuelles, chercher consciemment à les résoudre. Bien entendu, on ne peut espérer faire cela à l'aide des conceptions classiques, mais je ne donne pas le même sens que vous à la différence entre le déterminisme classique et la conception dialectique du déterminisme. Le déterminisme classique, à la façon de Laplace, ne tient pas compte des lois du changement qui existent réellement dans la nature. En effet, dans la conception de Laplace, la donnée des conditions initiales suffit à en déduire toute son évolution ultérieure. Ceci est absurde, d'abord parce que le nombre de molécules est infini. C'est absurde aussi parce que sont négligées - et pour cause - les lois dialectiques du changement :

A) « ...la dialectique considère qu'aucun phénomène de la nature ne peut être compris si on l'envisage isolément, en dehors des phénomènes environnants : car n'importe quel phénomène dans n'importe quel domaine de la nature peut être converti en non-sens si on le considère en dehors des conditions environnantes, si on le détache de ce conditions.» Un exemple : le mouvement de l'électron est sans doute incompréhensible si on ne tient pas compte des fluctuations du vide qui communiquent à l'électron une vitesse de l'ordre de 10^{10}cm/sec dans un domaine de l'ordre de 10^{-10}cm ce qui correspond à un coefficient de diffusion de l'ordre de l'unité. Les fluctuations du vide étant, pour le moment décrites statistiquement, mais les phénomènes individuels des fluctuations du vide n'étant pas inconnaissables en soi. Cet exemple est de même nature que le mouvement brownien. Le mouvement des grains de gomme gutte dans une suspension est incompréhensible si on ne postule pas l'existence des molécules. Nous ne sommes pas capables de décrire dans ce cas les processus individuels qui se produisent à raison de 10^{18} phénomènes par seconde ; mais dans certains cas, tels le mouvement brownien des particules de fumée dans un gaz, nous pouvons décrire les processus individuels, et, à l'aide d'un autre phénomène statistique, l'agitation du gaz, décrire les propriétés statistiques du mouvement de la particule de fumée.

B) « .. la méthode dialectique veut que les phénomènes soient considérés non seulement du point de vue de leurs relations et de leur conditionnement réciproques, mais aussi du point de vue de leur mouvement, de leur changement, de leur développement, du point de vue de leur apparition et de leur disparition.» Un exemple : l'émission spontanée. Avec une probabilité que l'on sait calculer, l'électron est capable de sauter d'un état quantique à un autre et de rayonner de l'énergie, un photon. C'est là un phénomène naturel, spontané, qui semble bien se produire même en l'absence de sollicitation extérieure. On calcule la probabilité par unité de temps pour que le rayonnement se produise quand on plonge l'atome dans du rayonnement à partir de l'instant t_0 et qu'on l'en retire à l'instant $t_0 + t$ alors que rien ne permet de penser que ce

phénomène se produise de cette façon dans la nature, l'atome excité étant plongé de façon permanente dans le rayonnement, ne serait-ce qu'en raison des fluctuations du vide.

C) « ... la dialectique considère le processus de développement ... comme un développement qui passe des changements quantitatifs insignifiants et latents à des changements apparents et radicaux, à des changements qualitatifs : or les changements qualitatifs sont , non pas graduels, mais rapides et soudain et s'opèrent par bonds d'un état à un autre». et :

D) « .. la dialectique part du point de vue que les objets et les phénomènes de la nature impliquent des contradictions internes, ... la lutte de ces contraires ... est le contenu interne du processus de développement, de la conversion des changements quantitatifs en changements qualtitatifs». (A, B, C, D,

C'est pourquoi (p9) je pense que vous n'avez pas le droit de dire que « le déterminisme est une conception générale de la forme des lois naturelles parfaitement adaptée à la description des phénomènes à l'échelle macroscopique» et d'identifier ce déterminisme au déterminisme laplacien, car le déterminisme mécaniste est incapable de rendre compte des changements qui se produisent dans la nature. C'est vraiment , pardonnez moi de l'expression , vous faire la part trop belle ! Le déterminisme , c'est en réalité le fait « que les relations et le conditionnement réciproques des phénomènes, établis par la méthode dialectique, constituent les lois nécessaires du développement de la matière en mouvement».

C'est le fait que le mouvement de la matière obéit à des lois .

En vérité, dans le cas de la mécanique quantique, c'est comme vous le dites , les concepts qui doivent être adaptés à la réalité .

Or, de quels concepts s'agit il ? Il s'agit du concept de corpuscule ponctuel , se mouvant dans le vide de la mécanique classique, l'onde, est , à peine abstraite, une ride à la surface de l'eau, l'ondulation d'une corde. Cette représentation de la réalité est certainement insuffisante. La particule est entourée de champs, au moins du champ électrique , elle ne se meut pas dans l'espace vide. Si l'on convient de représenter la particule comme une petite sphère de rayon de 10^{-12}cm par exemple, le champ électrique étant en $1 : r^2$ à l'extérieur de cette sphère, on n'a pas achevé la description de la particule, puisque l'on n'a pas la possibilité de décrire ainsi toutes ses propriétés, et particulièrement ses propriétés quantiques. Il me semble naturel d'admettre que la particule ainsi définie est entourée d'un champ d'une nature encore inconnue, qui est la cause des phénomènes quantiques, et que nous pouvons appeler, ni vous le voulez bien un champ quantique. une telle description qualitative générale, bien entendu ne nous apporte rien , si elle en reste là . Sa seule vertu, pour ce qui nous occupe ici, est d'exprimer la possibilité de donner une représentation plus complète des propriétés de la particule. Elle exprime la possibilité de réviser les anciens concepts de particule et d'onde, sans cependant in-

troduire le concept de complémentarité, en attribuant aux propriétés corpusculaires et ondulatoires des particules élémentaires une cause objective, connaissable, descriptible, représentable dans l'esprit humain. Les propriétés ondulatoires et corpusculaires de la matière ne sont pas complémentaires, elles existent objectivement, mais intimement mêlées. La complémentarité n'existe que dans la mesure où , rejetant la réalité objective de la position et de la vitesse des corpuscules, on considère que la position n'apparaît que lors d'une mesure de position qui trouble nécessairement le mouvement des corpuscules. Le phénomène objectivement réel d'interaction entre l'instrument et l'électron n'implique pas que la vitesse et la position n'existent pas objectivement. Je crois donc que ce n'est pas juste de dire (p 10) que « ceux qui veulent sauver le déterminisme sont bien forcés de .. rendre une signification absolue à l'un ou l'autre des aspects ondulatoire ou corpusculaire de la matière» Je crois qu'il n'est pas juste de réduire la connaissance des grandeurs de la mécanique quantique à la connaissance sensible, par le moyen d'appareil , de ces grandeurs. En effets, tous les appareils que nous imaginons, toutes les expériences, hypothétiques ou réelles que nous effectuons, ne sont que l'expression sous une forme concrète de la théorie, sont donc déjà contenus dans la théorie. Sans doute y a t-il des expériences que nous ne sommes pas capables d'imaginer, en raison de notre connaissance théorique. Veuillez considérer l'expérience hypothétique suivante : on prend un atome β radioactif , porté par un support transparent. Cet atome (à l'intérieur d'une surface de dimension Δq) émet un électron que l'on reçoit à très grande distance sur une plaque photographique où il laisse une trace qui permet de déterminer sa vitesse. Il me semble que les incertitudes sur la position et la vitesse qu'il avait en sortant de l'atome ne sont pas liées par les relations d'incertitude. (je connais les objections à une telle description : nous ne savons pas quelle était sa vitesse à la sortie de l'atome, puisque nous ne l'avons pas mesurée à ce moment , mais c'est n'admettre l'existence objective réelle que des grandeurs mesurées) .

Aussi, je ne crois pas juste de n'admettre la réalité objective des grandeurs physiques que dans la mesure où l'on fait des expériences pour en déterminer la valeur. Ainsi, on n'a su réaliser des jets moléculaires que lorsque la théorie cinétique des gaz a été assez avancée pour que l'on puisse concevoir les appareils qui permettent d'obtenir des jets moléculaires. Pourquoi n'y aurait il pas des phénomènes, déjà connus ou inexpliqués ou des phénomènes encore inconnus , qui ne satisferaient pas à la relation d'Heisenberg(dans le domaine atomique, bien entendu) ? J'en arrive ici à l'interprétation de Bohm. Si la théorie de Bohm ne visait qu'à une réinterprétation des quant, le résultat obtenu serait bien mince, puisque, naturellement, son interprétation redonne, dans la comparaison avec l'expérience, les résultats usuels. S vertu me semble de montrer que dans certains cas, (équation non linéaires, par exemple) et à très petite distance, les relations d'incertitude s'évanouissent ;

Peut être pourrez vous voir, au point où j'en suis , pourquoi je ne comprend pas

votre allusion (p 16) à la connaissance rationnelle ? Le déterminisme n'est pas une certitude laplacienne, mais est du à la conviction que la nature matérielle obéit à des lois ; on atteint à la connaissance rationnelle lorsqu'on établit les concepts qui nous permettent de nous représenter les phénomènes sous-jacents à la réalité observée . Or, si le point de départ de la théorie cinétique des gaz est une hypothèse statistique, et par conséquent qu'il est normal d'obtenir une loi statistique, par exemple pour la répartition des vitesse, le point de départ de la mécanique ondulatoire n'est aucunement statistique et cependant on aboutit à des lois statistiques. Historiquement, les physiciens ont été prodigieusement surpris de trouver des lois statistiques là où il n'en avaient pas mis. Tout l'embarras de Frenkel, de Blokinzev et autres provient de ce que l'interprétation des lois de la mécanique comme lois statistiques des ensembles de micro systèmes est indubitable , alors que rien dans les prémices de la théorie ne fait apparaître de probabilités .... C'est pourquoi je ne crois pas que le problème soit de dire (p 17) « on veut "justifier" l'emploi du calcul des probabilités en physique quantique et on ne croit pouvoir le faire que par un déterminisme sous-jacent» mais de dire si oui ou non les phénomènes individuels de la mécanique quantique sont descriptibles, s'ils ont oui ou non une réalité objective.

Il me semblerait incroyable que vous disiez qu'on ne peut pas se représenter les phénomènes objectivement réels que sont les phénomènes individuels.

Je ne crois pas non plus que la preuve de la réalité des phénomènes représentés par une théorie physique soit son objectivité. La preuve d'une représentation est dans la pratique, et non pas dans les communications que se font des observateurs différents (p 19) . Les interactions entre micro-systèmes et macro-systèmes sont objectivement réelles, mais la réalité des grandeurs physiques n'est pas liée à la comparaison directe avec l'expérience. Il s'agit là de toute la supériorité de la connaissance rationnelle sur la connaissance sensible, qui nous permet de nous représenter, par des concepts abstraits la réalité sous jacente aux faits qui nous sont sensiblement accessibles.

Encore une fois il faut poser franchement la question : est ce que les processus quantiques individuels sont inconnaissables par principe, car tel est le sens de la complémentarité.

Enfin, il me semble que votre schéma du mouvement de la pensée en théorie quantique ne recueillera pas l'approbation des marxistes. En effet, ce n'est que dans l'esprit de Bohr et de Heisenberg que le déterminisme, c'est le déterminisme laplacien. Il y a des tas de bonnes raisons pour rejeter ce déterminisme,et Engels (Ludwig Feuerbach) Lénine (Matérialisme et Empiriocriticisme) les ont données . Ce déterminisme est donc rejeté. Mais il est remplacé par les lois dialectiques du mouvement (c'est là la synthèse). La synthèse dont vous parlez (p 9) consiste bien à donner de nouvelles lois au mouvement de la matière mais au prix de l'introduction d'un inconnaissable en soi, la description des phénomènes individuels. C'est bien de la dialectique, mais c'est

de la dialectique idéaliste, hégelienne, mais non pas de la dialectique matérialiste, du matérialisme dialectique. Il est vrai que « la relation de complémentarité est ... le premier schéma dialectique précis, dont la structure formelle a pu être exactement établie par les logiciens» comme vous dite p 22, mais ce schéma dialectique est typiquement idéaliste , il est le reflet d'un mouvement de rejet du matérialisme , il exprime le refus de croire à la possibilité de faire une représentation dans notre esprit de tous les phénomènes objectivement réels. Vous le dites à un autre endroit : c'est le schibboleth d'une classe ?

Je m'aperçois que j'ai été beaucoup plus long et bavard que je ne le pensais en commençant, peut être ue j'attendrai maintenant quelques temps avant de vous écrire encore une fois. Peut être disposerez vous d'assez de temps pour me répondre et me dire si j'ai péché par incompréhension de votre texte. Il est en tous cas bien dommage de se limiter à un échange épistolaire ; peut être l'Université de Manchester pourrait elle trouver un prétexte pour me faciliter un voyage sur les rives de l'Irwell ... je n'ose pas trop y compter. De toutes façons, je compte venir à Manchester l'an prochain pour le congrès de Radio-astronomie. La question est assez importante pour justifier un voyage, mais l'urgence du développement de la mécanique quantique n'est pas si grande qu'elle ne puisse attendre quelque peu.

J'espère que vous ne trouverez en aucun point le ton de cette lettre trop vif ou malsonnant . Excusez moi de toutes façon , mais tout cela a été écrit au fur ét à mesure de la lecture de votre article, sans souci des répétitions ni de la forme.

Si vous voulez bien, je remets à une autre fois la discussion de la théorie de Vigier, qui a fait des progrès dans le domaine conceptuel, mais n'en a pas beaucoup fait dans le domaine pratique. Elle me semble pleine de promesses.

En espérant avoir bientôt le plaisir de vous lire, je vous remercie de m'avoir fait l'honneur de me communiquer à l'avance votre texte et je vous prie de croire à mes sentiments très sincèrement amicaux

A.1.7 | Léon Rosenfeld à Frédéric Joliot-Curie (6 avril 1952)

Manchester, le 6 avril 1952.

Mon cher Joliot,

Je crois de mon devoir de vous signaler une situation que je considère très sérieuse et qui vous touche de près. Il s'agit de vos jeunes « poulains» Vigier, Schatzman, Vassails e tutti quanti, tous jeunes gens intelligents et pleins du désir de bien faire. Malheureusement pour le moment ils sont bien malades. Ils se sont mis en tête qu'il fallait mordicus abattre la complémentarité et sauver le déterminisme. Le malheur, c'est qu'ils n'on pas compris le problème et – chose plus grave – qu'ils ne font aucun effort sérieux pour le comprendre. J'ai fait ce que j'ai pu pour les repêcher. La copie-ci jointe d'un article destiné au volume qu'on prépare en l'honneur de L. de Broglie vous le montrera. J'ai pris la peine de faire explicitement l'analyse marxiste de la question et de mettre en évidence le caractère à la fois dialectique et matérialiste de la complémentarité. Pour toute réponse, Schatzman m'envoie un factum bourré d'erreurs de physique et de citations de Staline qu'il prétend opposer, par une casuistique qui m'effraie, aux évidences de la physique. Ceci révèle un profond malaise chez ces jeunes gens et il est grand temps (s'il n'est pas déjà trop tard) d'y mettre bon ordre. Ils sont sous l'influence d'une scolastique qui emprunte les formes extérieurs du marxisme, mais est aussi opposée à son véritable esprit que le plus noir catholicisme. les meilleurs physiciens soviétiques sont en butte aux attaques de cette scolastique, qui fait encore plus de ravages à Moscou qu'à Paris. Il conviendrait tout de même que les physiciens français se montrent capables de distinguer l'ivraie du bon grain. Pour le moment, ces jeunes fanatiques sont la risée des théoriciens et ils discréditent le marxisme t le parti à la grande joie des réactionnaires comme Destouches et de Broglie.

Je suis prêt à vois donner tout l'appui possible pour redresser la situation, sur la base des idées exposées dans mon article. Mais c'est à vous, mon cher Joliot, de prendre l'initiative. Je sais que vous avez à faire face à bien d'autres problèmes, mais il me semble que celui-ci est éminemment digne de votre attention.

Croyez, mon cher Joliot, à mon affectueux dévouement.

A.1.8 | Léon Rosenfeld à Évry Schatzman (6 avril 1952)

Mon cher Schatzman,

Votre lettre me laisse des impressions contradictoires. Que vous ayez pris la peine de me communiquer longuement vos réactions spontanées à mon article me semble une marque de confiance. Mais la teneur de ces réflexions n'indique que trop clairement que vous n'avez aucune confiance dans mon jugement. Quelle est la « synthèse » ?

Je constate que votre groupe ne comprend pas le problème. Vous répétez par exemple qu'« il est impossible de décrire le phénomène individuel » et pour comble vous essayez même de me le faire dire ! Or, rien n'est plus faux. À quoi bon vous l'expliquer si vous ne faites aucun effort sérieux pour comprendre ? L'article de Bohr dans le volume « Einstein, philosopher-scientist » et le mien doivent vous suffire si vous en abordez la lecture sans idées préconçues. Mon article est une perche que je vous tend pour vous sortir du bourbier.

Bien dialectiquement vôtre,

Léon Rosenfeld

A.1.9 | Frédéric Joliot-Curie à Léon Rosenfeld (21 avril 1952)

Monsieur le Professeur ROSENFELD
The Physical Laboratories
The University
MANCHESTER 13 (Gde Bretagne)

Cher Rosenfeld,

De retour à Paris, je trouve votre lettre et je vous en remercie vivement.

Je vous comprend parfaitement en ce qui concerne les jeunes scientifiques qui se sont adressés à vous. Il s'agit effectivement de jeunes gens intelligents et pleins du désir de bien faire.

Mais je crois comme vous qu'il est nécessaire d'examiner avec eux leur position idéologique d'une façon très sérieuse.

Autant je suis d'accord avec leurs préoccupations concernant les grands principes de la physique moderne, autant je suis d'accord avec vous sur la nécessité d'en comprendre le sens exact et profond avant de se lancer dans les discussions avec des citations qui ne sont que des placages trahissant parfois leurs auteurs.

je vais m'en occuper très sérieusement et je vous remercie de vouloir m'aider dans cette tâche.

Je vous tiendrai au courant de notre action.

En espérant avoir le plaisir de vous rencontrer bientôt,

Je vous prie d'agréer, Cher Ami, l'expression de mes sentiments les plus dévoués.

[Signature] Frédéric Joliot Curie

A.1.10 | Évry Schatzman à Léon Rosenfeld (28 avril 1952)

28 Avril 1952

Cher ami,

En recevant votre lettre, j'ai eu quelques remords de vous avoir répondu comme je l'ai fait, à la fois pour la forme et pour le contenu. Je crois, en particulier m'être mal exprimé au sujet de la question du phénomène individuel.

Vous trouverez ci-joint, un manuscrit (en épreuves) pour *la Pensée*. Je vous serai très reconnaissant s'il vous était possible de me donner votre avis sur ce texte. J'ai mis dans ce texte tout ce qui me semblait être le plus sûr du point de vue de la théorie de la connaissance, mais j'ai peut être été imprudent du côté des prédictions sur le développement des quanta : je pense coupe de ce côté là.

Dans l'attente de vous lire, croyez, je vous prie, à me sentiments sincèrement amicaux.

A.1.11 | Évry Schatzman à David Bohm (15 mai 1952)

May 15th 1952

Dear David,

I read your letter with great excitement and showed it to Vigier. Actually the situation is very complicated for the following reasons :

1. L. de Broglie is a powerful. Getting subsides or financial help depends essentially of its good will. Unfortunately he is very sensitive, without practical sense, and we need its help for publications of papers on theoretical physics ; On the other hand, we cannot trust him very much. One of its paper is made partly of ideas of Vigier expressed to him privately.

2. His absence of practical sense has a very heavy consequences. He has been very much influenced by Destouches. He never tried to built a school of theoreticians. He never dared of having an [?] of theoretical physics. Every thing just came to him.But how naive he may be, he is very class conscious. His attitude toward materialism and idealism is very much influenced by its class consciousness. In physics, he has some very materialistic point of view, and he personally does not like either Bohr or Pauli, but he does not dare too mu h to advocate the pilote wave theory in front Pauli (the idealistic point of view) and von Karman (the F.B.I.)

3. This brings me to the purpose of my letter : giving you an account of the seminar with Pauli.

L. de Broglie invited for that seminar a lot of physicists : Francis Perrin (the son of Jean Perrin – Francis Perrin is a well known social-democrat and successor of Joliot at the « Commissariat à l'Énergie Atomique» – he is very idealist in philosophy and sticks strongly to the point of view of Bohr), Leprince-Ringuet (a pupil of Maurice de Broglie, elder brother of L. de Broglie. Leprince-Ringuet is an experimentator in cosmic ray), Ed. Bauer (a physicist, still influenced by materialistic theories) and foreign scientists actually in Paris, including von Karman (who is actively working on behalf of the Pentagon... we should consider him as representing the F.B.I.). The ceremony was ruled just like a ballet. Vigier spoke, then Pauli, then de Broglie, and then came the discussion. I think Vigier already told you about the seminar.

The most remarkable was the speech of de Broglie. It can be summarized in the following way : if Bohm's theory is right, I said it before him, if Bohm's theory's wrong I also said it. But other people, less subtil, I guess, were on the contrary, very much surprised that de Broglie took so firmly the defence of the pilote wave theory.

But things are very intricate.

We were surprised of the weakness of the arguments of Pauli. We thought he would give some powerful objections, and he did not give any. That proves the weakness of

its attitude, the strength of ours. But the new theory can be accepted now only if new results are brought. We regret that we spent so much time in discussions too early, unable to answer on the technical side to many questions.

4. I wish to give you which answer Langevin gave already in 1934 to the objection related to statistics.

Langevin (La Notion de corpuscules et d'atomes. Actualités scientifiqueset industrielles N°132. Herman 1934) considered the following complexions :

$$\underset{1}{\boxed{AB}\boxed{}} \quad \underset{2}{\boxed{A}\boxed{B}} \quad \underset{3}{\boxed{B}\boxed{A}} \quad \underset{4}{\boxed{}\boxed{AB}} \tag{A.1}$$

and he said :

« J'avoue que j'avais été gêné quand j'ai fait au Collège de France, autrefois, un enseignement de cette mécanique statistique, par l'inconséquence qu'il y a à affirmer, d'une part, que les molécules sont identiques et par conséquent indiscernables, et, d'autre part, à leur attribuer une individualité pour évaluer le nombre de complexions ; ce qui conduit à considérer comme différentes les complexions 2 et 3 tout en reconnaissant, comme conséquence de la première affirmation que rien ne permet de les distinguer, que la différence faite entre elles n'ont aucun sens expérimental» (p 39 et 40)

Considering the « double solution» – it has been shown that the same equation cannot have two solutions with the same eigenvalue of the energy, one of the solutions being regular, the other one being singular – we think that actually the description of the singularity, the description of the structure of the singularity, is not given by the same equation as the description of the motion.

Sincerely
Evry

P.S. If you still have reprints of your papers on plasma oscillation could you send me one ?

P.S. Vigier will also answer to your letter and give you an account of the seminar. Some of the Russian papers have been translated into French. Would you dare receive some of them ?

A.1.12 | Léon Rosenfeld à David Bohm (30 mai 1952)

30st May 1952

Dear Bohm,

I certainly shall not enter into any controversy with you or else on the subject of complementarity, for the simple reason that there is not the slightest controversial point about it. But I shall gladly reply to your kind letter in a spirit of friendly conversation about some of the point you raise.

Obviously you are thinking that my assertive attitude in this matter is extravagant, inasmuch as I might be forgetting that I and even Bohr are also subject to error. I may reassure you by telling you something of my experience in working on this subject with Bohr. In our work on the problem of measurability of fields we have made probably all the errors that could conceivably be made before reaching at last solid ground ; It is just because we have undergone this process of purification trough error that we fell so sure of our results. To give only one example : we have not hesitated to throw doubt on the validity even of Maxwell's equations in vacuum, when a certain argument (later recognised as erroneous) suggested to us that they could be wrong. i tell you this to show you that there is nothing dogmatic about our attitude of mind, and there is no truth in your suspicion that we may just be talking ourselves into complementarity by a kind of magical incantation. I am inclined to retort that it is just among your Parisian admirers that I notice some disquieting signs of primitive mentality.

The difficulty of access to complementarity which you mention is the result of the essentially metaphysical attitude which is inculcated to most people from their very childhood by the dominating influence of religion or idealistic philosophy on education. The remedy to this situation is surely not to avoid the issue but to shed off thus metaphysics and learn to look at things dialectically.

I find your position regarding « simplicity » a bit confusing. You start by telling me that the causal point of view is to be preferred because it is simpler, but further on you state that those who reject it are oversimplifying the issue. This inconsistency merely shows that the idea of simplicity cannot be of any use as a criterion of suitability of physical theories. The role of a physicist is to adapt his thinking to Nature, regardless of whether this process is simple or not. The main thing is not to accept any other guidance than that of Nature herself.

With kind regards,
yours sincerely
(Professor L. Rosenfeld)

A.1.13 | David Bohm à Évry Schatzman (16 juin 1952)

June 16, 1951[3]

Dear Evry

I am enclosing you a copy of a manuscript to be published in the Phy Rev, on the question of probability in quantum theory. Please show it to Vigier & Regnier, and let me have your comments as soon as possible.

Sincerely D Bohm

P.S. It might be better not to show this article to de Broglie for a few months as he as the unpleasant habit to take other people's ideas without giving them credit. He is able to publish in 2 weeks whereas the Phys Rev takes 6 months. But use your own judgment on this. Perhaps it will stabilize the jobs of Vigier & Regnier if de Broglie feels more optimistic about the theory. If this is true, then by all means show it to him.

3. La date est manifestement fausse. En considérant son contenu, la lettre date vraisemblablement de 1952.

A.1.14 | Évry Schatzman à Gombás Pál (28 juillet 1952)

28 juillet 1952

Professor P. Gombas
Physical Institute of the
University for technical Sciences
BUDAFOKE ut 8
BUDAPEST 112
HONGRIE

Mon Cher Collègue,

Je vous envoie, à la requête de David BOHM avec qui je suis en correspondance, les tirés à part ci joint de ses articles sur la mécanique quantique.

Peut être savez vous que d'autres travaux sont en cours sur cette question, démontrant certains points qui, jusqu'à présent n'étaient que postulés.

Croyez, mon cher collègue, à mes sentiments très distingués.

E. SCHATZMAN

A.1.15 | David Bohm à Évry Schatzman (7 septembre 1952)

7 sept 52

Dear Évry,

I have sen you several months ago some copies of a new manuscript « Proof that $P(x)$ approaches $|\Psi(x)|^2$ in Causal Interpretation of Quantum Theory ». I am anxious to have your comments, as well as those of Vigier and Regnier.

I have read with interest your article in Pensée. It is a very good article – quite accurate – and avoids unnecessary problems at the purely philosophical level, which would tend to confuse the issue. Our position is so good that a straight forward technical exposition combined with a clear statement of the philosophical issues is all that we shall need in the long run, in order to obtain a victory. It is no clear to me that Pauli and Co. will put up a better fight – you were right ? Others like Wigner will be even more effective, by ignoring the subject and minimizing its importance. But we shall win within 5 or 10 years – of this there can be no doubt (Provided that we have peace).

I notice that you call me a « disciple of Einstein ». This is not very accurate. Actually I was a strong « Bohrian » and wrote my book under the assumption (lates proved wrong) that the principle of Complementarity was a materialist point of view. It certainly is very dialectical, but I did not see at that time that it is not materialist. After writing my book, I sent a copy to Einstein. He called me up, asking to discuss the book, especially the Section on the Paradox of EPR, which he liked very much. He thought I gave Bohr's point of view the most convincing possible presentation, but he still refused to accept it. He then argued for some time, and he ended up by convincing me that his objections were not yet answered. I thought about it for a while, becoming more convinced all the time that he was right. Finally, I decided to look for a causal interpretation within few weeks, I hit upon the idea which I published, not knowing about de Broglie's work until later. It took me about 10 hours of work, distributed over 2 months to convince Einstein that it made sense, but he never really liked it. He only thought it was good to propose it to break out the present stagnant situation in physics.

It is interesting that I owe the causal interpretation in a sense to the Un American Activities Committee. Late in 1950, I was indicted for refusing to testify before them, and was suspended from Princeton University while waiting trial (set for June 1951). During this period, I had plenty of time to think and to work, free from teaching duties, etc.

It now looks as I won't get my passport back in the foreseeable future, so I'll have to be in Brazil for a while. Meanwhile, I have gotten a new assistant from the US who

wants to work on the causal interpretation. He is an expert on relativity , and with his helps, I hope in a month or so to understand what you ad Vigier have done. Meanwhile, our ideas are as follow :

We want to use Einstein's « bein-vector » form of relativity but we wish to interpret the frame of the bein vector as describing the « principal axes » (4 dimensional) of an actual particle located at the point in question. These bein-vectors can be expressed in the form of spinors, so that Dirac'equ. represents the rate of (4 dimensional rotation) of such particles, as is suggested by the negative energy « sea » needed in Dirac's equation. Since the particles are extremely small, however, we may for most purposes use a « field approximation » in terms of the density of energy momentum, spin angular momentum, etc. The only effect of the size if the particle at this level of approximation, is to introduce an « intrinsic » angular momentum in the fluid. Thus, we come to a point of view that is in practice at the moment close to yours, although we have differences in principle that will in the long run create divergences between us. I am very anxious to hear from you soon

Sincerely David Bohm

P.S. I am interested in receiving translations (English of possible, otherwise French) of the Russian articles on this subject.

A.1.16 | Évry Schatzman à David Bohm (21 septembre 1952)

September 21st 1952

Dear David,

Thanks a lot for your awfully nice letter of ... about September 7th. I thank you especially for your appreciation of my paper in « La Pensée». Actually, you are the first who took care in letting me know one's opinion. Considering our exchange of letters going on for about one year now, I felt very anxious about that long article. I feared it would not satisfy the very high requirements you put to such an article. I did my best and it took an awful lot of time, writing it, correcting it, improving it, and so on... The first draft [?] of January 52. The proofs are of May and the very last corrections were done beginning of June.

I was certainly interested, reading the history of your advance in the field of causal theory. It comes in very well with my feelings concerning your book.. It is quite clear reading your book that you are a materialist ; but place to place, things need to be set up side down, exactly as it was necessary for the idealistic dialectic of Hegel. In such places, my materialistic mind did not feel well. Your papers, in Phys. Rev. put every thing in place. But it was especially interesting to read of which consequences were your relations with the un american activities committee. Such a piece of history will prove, later, that it is necessary now to be a conscient materialist, rather than a naïve one, in order to contribute to the progress of science.

I regret very much that you will not get your passport for a long time, as it makes it more difficult to see you in France.

I apologize for not having answered your nice letter. I sent your reprints to Gombas in Hungary, and he acknowledged receipt very kindly. He is anxious receiving other informations about your work.[4]

In fact, I was very busy, since May, for many reasons, which I am going to summarize shortly.

1. I am an astrophysicist, mainly. Even when I am interested in quantum mechanics, all my duties remain. I have 3 or 4 students whose work I supervize. All of them are engaged in Doctor degree's work. It takes a lot of time discussing then, giving them advices, and so on...

2. I had to pursue the meeting of the International Astronomical Union in Rome. There was a symposium on the evolution of stars, and I was the secretary of the symposium. I just mention here that the soviet astronomers gave a very great contribution to the advance in that field.

4. Dans les archives, un accusé de réception de Gombás Pál (1909-1971) est joint à la lettre datée du 10 septembre 1952 et rédigé en allemand.

3. We have a Union of Scientific workers and faculty professors ; That union has a section in every faculty town. I am the secretary of the section of Paris. (our union is adhering to the world federation of scientific workers). last political events in France made our work more necessary than ever. We have to fight against drastic reductions in the budget of science and education, we have to fight for independence and freedom of professors and scientific workers, and a by product of our activity is the fight for liberty for every body. The last time, that fight had included the participations to the demonstrations against Ridgway, organisation of meetings for the freedom of André Stil, Jacques Duclos, and others. Altogether, I have been very busy.[5]

During the summer, I went with my wife, and my 3 children to the Alps, but I could not rest as much as I would have needed. I had still to prepare the Rome meeting, and undertake the task of writing a big paper consisting of cosmological theories in favor of Europe and America - that paper is going to be published in a new soviet review : « Questions of Cosmogony». I am now in Vichy, a summer resort for bath and thermal water, for 3 weeks, trying to take care of my stomach.

But I have still to prepare for publications the minutes of the symposium on stellar evolution, and to write the second half of my paper on cosmogony.

For almost 2 years now, I did not have time to think and to work peacefully, always lasshund by some urgent duty.

I come now to your very good paper about the proof that $P(x)$ approaches $|\Psi(x)|^2$. We have discussed it, Reignier, Vigier and I. It seems to us that you have found the demonstration of the theorem. Your proof is very convincing, and I do not see any place where an error might have been squeezed. As a consequence, the number of postulate has decreased by one unit, and it now less than in « classical» quantum mechanics. I think that your demonstration will remain like a monument of modern physics, and I congratulate you very sincerely for it.

You will very soon hear from Vigier. His work has progressed very much during summer time. He has discussed it with de Broglie many times, and de Broglie has changed his mind again. De Broglie has actually helped considerably Vigier in putting his ideas in a clear shape. And de Broglie claims he has found a demonstration of the statistics, which overcomes completely the fallacious argument of Pauli.

Something else is very surprising : Rosenfeld (Manchester) has prepared for the sixty years anniversary of Louis de Broglie a paper about complementarity. Rosenfeld tries to give the demonstration that complementarity is the best achievement of dialectical materialism. Rosenfeld claims to be materialistic and Marxist. But his paper

5. Il s'agit de la manifestation organisée par le PCF le 28 mai 1952 contre la venue du général américain Matthew Ridgway (1895-1993) à Paris visant à dénoncer l'utilisation d'armes bactériologiques par les américains en Corée et en Chine. De nombreuses arrestations ont lieu le soir même, dont des dirigeants du PCF. Michel Pigenet, *Au cœur de l'activisme communiste des années de guerre froide : « La manifestation Ridgway»* (Paris : L'Harmattan, 1993).

is nothing but a summary of all the idealistic dialectics of Bohr and others. Rosenfeld is a pupil of Bohr, and that is probably the reason. I wrote to him a long long letter, giving my reasons for rejecting his conclusions. And I fear that from a friend I make an enemy (at least on ground of quantum mechanics).

Another point. I am convinced, now, that reddening of intergalactic nebulae is not due to actual recession, but to the oldening of photons. I hope very much that Vigier's work will give us the solution of that problem. I would be glad if you would keep in mind that the explanation of reddening of light from remote sources should be come out as a by product of causal interpretation of quantum mechanics.

Sincerely

Evry Schatzman

N.B. As soon as I am back in Paris I send you all available translations of these revision papers.

A.1.17 | Gérard Vassails à Évry Schatzman (non datée 1952)

Mon cher Schatzman

Labérenne m'a mis au courant de votre conversation téléphonique. Il est un peu tard en effet maintenant pour que nous parlions à quatre (avec Cotton) de ton article et y apportions quelques améliorations – si tu les juges nécessaires – comme nous en comptions le faire.

Labérenne t'a dit que je considère l'article comme un apport important, positif, à la discussion. Mais, en tant que Comité de Rédaction d'une revue comme La Pensée, lue, appréciée, jugée en Union Soviétique et dans les Démocraties populaires, sans parler de son rôle de mobilisation et d'orientation idéologique en France, nous avons collectivement, et sous l'égide du comité directeur, une grave responsabilité.

C'est pourquoi la ligne idéologique générale, les bases philosophiques, d'un et article et par excellence d'un article d'une grande valeur sur le plan de la spécialité comme le tien, doivent être examinées avec soin par nous et rendues aussi justes que le peuvent notre propre niveau idéologique, et cela en joignant toutes nos force, celles des responsables de la revue et celles des auteurs.

Ton article, du point de vue que je viens de situer, présente deux inconvénients, deux défauts, à mon sens. Le premier est qu'il risque de faire apparaître la science soviétique comme à l'arrière-plan par rapport à Einstein et ses disciples, et même par rapport à Louis de Broglie. Je me place au point de vue du lecteur moyen, et de l'impression générale que ton article lui produira. Je ne crois pas qu'il en retirera cette leçon, cette vérité historique, qu'aujourd'hui la science soviétique est à l'avant-garde dans le domaine de la critique de l'interprétation de Bohr-Heisenberg de l'appareil mathématique de la mécanique quantique, de l'interprétation physique juste de cet appareil, de l'approfondissement, jusqu'à une théorie de processus individuel, de la mécanique quantique.

Le second inconvénient est que le lecteur (j'entends bien entendu le lecteur capable de retirer un bénéfice de la lecture de ton article, donc déjà quelque peu dégrossi, car c'est à de tels lecteurs que ton article s'adresse et c'est très bien ainsi) – le lecteur tirera de ton article (voir notamment le début du sommaire introductif) la conclusion que la « la théorie de la mesure » est, non pas une interprétation de l'appareil mathématique de la mécanique quantique, interprétation que je considère, et que je l'ai démontré dans ma conférence de Lille du 2 mai denier, comme partie intégrante de l'interprétation de Bohr, comme indissolublement liée à la complémentarité des concepts classiques etc... mais une acquisition, une découverte authentique de la physique quantique, ou précisément, tout l'enjeu du débat qui se déroule actuellement en URSS est là : Fok, notamment, sauve la « théorie de la mesure », Omelianovski la rejette, Blockin-

zev partiellement aussi, déjà Einstein soutenait (1935 je crois) que le caractère fortuit, statistique des processus quantiques ne saurait provenir « entièrement » de la mesure, etc...

Tu n'es, bien entendu, nullement tenu à adopter mon point de vue (qui est celui de plusieurs auteurs soviétiques) – à savoir le rejet complet de l'interprétation de Bohr, y compris la « théorie de la mesure ». Mais ce que l'on peut être en droit de te demander pour une revue comme la notre, c'est d'avertir le lecteur en lui disant – au minimum – que la « théorie de la mesure » est une interprétation de l'appareil mathématique de la physique quantique et qu'elle est rejetée par certains auteurs.

je ne mésestime par le [?] que tu fais en présentant comme tactique (se placer sur le terrain de Bohr...) l'adoption de la « théorie de la mesure » par D. Bohm et autres. Je crains que le lecteur n'aperçoive pas le caractère essentiel de l'idée du rejet pur et simple de cette « théorie », je crains que la perspective générale ne soit faussée par lui.

À mon sens, le matérialisme conséquent exige ce rejet ; L'appareil mathématique de la M.Q. – entant que vérifié par l'expérience (exemple théorie de la quantification de l'atome d'H, th. de Dirac etc...) – reflète avec une approximation satisfaisante la réalité objective. Il reflète donc aussi bien les mouvements stationnaires dans un atome d'H de l'ère primaire que dans un atome d'H actuel. (L'argument de Lénine, qui doit être le pivot de notre pensée !). Or, les relations d'Heisenberg sont inhérentes à l'appareil mathématique précité (et non pas fondée par les fameuses expériences idéales qui n'en sont que des illustrations particulières). S'il en est ainsi, l'interprétation physique juste de cet appareil mathématique ne doit en rien faire intervenir la mesure, car celle-ci est un processus humain de connaissance ; la détermination d'un rapport quantitatif naturel lequel préexiste à la mesure même. Cette position – la suite de la discussion le montrera – est inattaquable, inexpugnable.

Je te passerai, dès que Caveing me l'aura rendu, le texte de ma conférence de Lille que j'ai beaucoup murie, je vois qu'il serait utile que nous la discutions en cercle, car elle apporte du nouveau, d l'avis de ceux qui la connaissent. Cette conférence d'assister à votre réunion du 3 et le flot des compositions, des tâches de fin d'année scolaire, d'assister à celle du 10 et même de me livrer à une quelconque activité dans le domaine qui nous [?]

Bien fraternellement
Vassails

A.1.18 | David Bohm à Évry Schatzman (9 octobre 1953)

Oct 9, 1953

Dear Evry,

I am very surprised that so few of my letter have been received in France and that so few letters from France reach me. I have send the following letters recently ; 2 letters to Vigier at his house, one at Rue Pierre Curie. (1) letter ti you at your house, ans (1) letter to Regnier at his house. Could you please let me know how many of them have arrived ? As for me, I have thus far received 1 letter from Vigier, Sept 15. I think it is important to try to find out why the letters are not being delivered, and to try to remedy the situation. It appears for example that letters sent to a private residence are perhaps less like to arrive than those sent to a place of work. On the other hand, it is very hard to understand why letters sent to me did not arrive. For if they were being stopped in Brasil, why are some of them sopped and no others ? Is it possible that Vigier is recognized when he mails a letter ? In order to forestall such a possibility, he should perhaps entrust the mailing of letters to other people. Also, whenever sou send a letter to my University address, please send a brief note summarizing the most important points to my home address

Rua Carlos Comenale 68
São Paulo, Brazil

As for the [?] on probability in quantum theory, I haven't prepared it yet because I am waiting for comments from France on what we have done thus far, and partly because I am still not satisfied with what we have done. Discussion with the people here convinces me that the hydrodynamical model will be disliked by many people. Thus, since an important purpose of the paper is « propagandistic», this purpose mauy not be served. Perhaps we should return to the more general idea of a fluctuating Ψ field, instead of using the hydrodynamical model.

Very sincerely yours
Dave

A.1.19 | Évry Schatzman et Jean-Pierre Vigier à David Bohm (13 octobre 1952)

Dear David,

I have get your letter of September 24th,[6] and, with cooperation of J.P. Vigier, I write the following (actually, dictated by Vigier) :

Vigier's thesis ha been accepted by L. de Broglie, and is going to be published next month in Paris ; It [?] with the following chapters, which I summarize hereafter, answering by the way all your question and giving the necessary references.

I. Generalities on affine space-time, which you can find in Eisenhart's book on non riemannian geometry (Princeton University Press, 1927). it contains the conclusion that the simplest connection one can use for representing space time is the so called projection connection

$$\Gamma^i_{kl} = \{^i_{k,l}\} + e\delta^i_k A_l \tag{A.2}$$

V. has suppressed the imaginary sign as an unnecessary complication.

II. Geometrical theory of elementary deformations of space time

a) One can show that the most general deformation of space time is given by the translation ${x_\mu}' = x_\mu + \xi_\mu \mathrm{d}h$, where $\mathrm{d}h$ is infinitely small ; and one neglects all terms with high powers of $\mathrm{d}h$.

The corresponding modifications of the metric will be $S_{\mu\nu} = \left(\frac{\delta\xi_\mu}{\delta x^\nu} + \frac{\delta\xi_\nu}{\delta x^\mu}\right)\mathrm{d}h$. Naturally if we chose a vector field obtained by parallel displacement of one vector we obtain

$$\frac{\delta\xi_\mu}{\delta x^\nu} = \xi_{\nu;\mu}$$

but you are not obliged to do so, and any covariant expression can do.

Now introduce Einstein's beingroßen that is an orthogonal frame at each point. In this frame you can define a vector with help of Einstein half vectors ψ by writing

$$\xi_\mu = \psi^\star \gamma_\mu \psi.$$

See fo example Fok in Zts. f. Phys. 57 (1927) – Fok. C.R. Acad. des Sciences (Paris) 188 p. 1470.

This matrix, γ^μ, must obey certain commutation relation in order to be compatible with Lorentz transformation : see for example : Le Couteur Proc. Roy. Soc. A p 202, 1939, and Bhabha. Rev. Mod. Phys. 1949. Theory of elementary particles.

These relations of commutation are

6. Il s'agit d'une lettre datée du 24 septembre 1952, non retranscrite.

$$(\gamma_\mu, I_{\zeta\sigma}) = g_{\mu\zeta}\gamma_\mu - g_{\mu\sigma}\gamma_\zeta$$
$$(J_{\mu\nu}, I_{\zeta\sigma}) = -g_{\mu\zeta}I_{\nu\sigma} - g_{\nu\sigma}I_{\mu\zeta} + g_{\mu\sigma}I_{\nu\zeta} + g_{\mu\zeta}I_{\mu\sigma}$$

where

$$J_{\zeta\mu} = \gamma_\zeta\gamma_\mu - \gamma_\mu\gamma_\zeta$$

is the commutator.

b) Now, you can introduce with Fok and Weyl an arbitrary linear operator $C_l\psi$ which will bind contiguous half vectors in different beingroßen frames, provided it is consistent with tensor formulas : $\left(C_l^\dagger\psi^\dagger\gamma_i\psi + \psi^\dagger\gamma_i C_l\psi\right)$ must transform as tensor of second rank/ You find that if you take for C_l the expression $i\left(\frac{\partial}{\partial x_l} - i\epsilon A^l - 2\frac{\partial}{\partial x^\nu}I_\nu^l\right)$, the last term corresponding to the instantaneous rotations of the frame, you obtain for the expression $\left(C_l^\dagger\psi^\dagger\gamma_i\psi + \psi^\dagger\gamma_i C_l\psi\right)$, just the so called symmetrical canonical energy momentum tensor of Belifante-Rosenfeld (The minus sign in the Dirac case is due to this fact)

c) Now, if you have $\xi_\mu = \psi^\dagger\gamma_\mu\psi$, by a convenient change of frame, you can always split it into a sum of irreducible representations of the orthochronous Lorentz group ; the same with this corresponding $\delta_{\mu\nu}$. Therefore, you can sa that the irreducible representation of this group correspond to elementary space time deformation. In ordinary space time oyou see that any vector ξ_μ plus its $\xi_{\mu;\nu}$ can be represented by a sum of three lowest order irreducible representations (Dirac, Klein-Gordon, Proca) with respectively four, five an ten components.

III. Deduction of quantum mechanical equations from unitary affine theory.

a) Now, you impose field equations on space time and chose the conditions of variation

$$\delta\int \log\sqrt{\det(g_{kl} + f_{kl})}\mathrm{d}\tau = 0 \tag{A.3}$$

w.r.t. the A_μ to determine them ; and

$$R_{kl} - \frac{1}{2}g_{kl}R = -8\pi\gamma\frac{\mathrm{d}\log\sqrt{\det(g_{kl} + f_{kl})}}{\mathrm{d}g^{kl}} \tag{A.4}$$

to determine the $g_{\mu\nu}$.

b) Now you come to the conditions

$$\mathrm{d}_\mu\left(S_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\delta_{\mu\nu}S\right) = h_\nu\text{Lorentz force} \tag{A.5}$$

These result automatically and independently of the field equations from the very existence of the invariant Lagrangian $\log\sqrt{-\det(g_{kl}+f_{kl})}$ (see for example, Eddington Math ; Theory of relativity, p 228) if you add the equation

$$\mathrm{d}_\mu j_\nu = 0 \tag{A.6}$$

which result from (A.3) and replace in these expressions the $g_{\mu\nu}$ by $\delta_{\mu\nu}+\lambda\theta_{\mu\nu}$ (where $\theta_{\mu\nu}$ is the canonical energy momentum tensor, and λ a [?] function satisfying the auxiliary conditions :

$$\partial_\mu\lambda\cdot\psi^\star\gamma_\mu\psi = 0 \tag{A.7}$$

and

$$\partial_\mu\lambda\cdot\theta_{\mu\nu} = 0 \tag{A.8}$$

in order that the decomposition in elementary deformations being possible) you find just the Bhabha's equations on ψ, that is

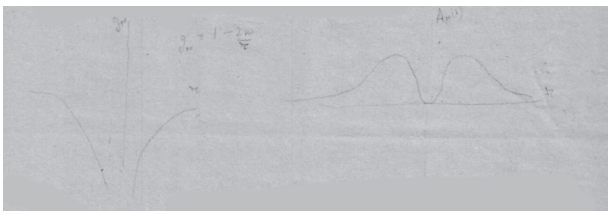
$$\gamma_\mu\left(\partial_\mu - ieA_\mu\right)\psi = m\psi \tag{A.9}$$

where m is a constant. In fact, the more general solution satisfying the equation $\partial_\mu\left(\psi^\star\gamma_\mu\psi\right) = 0$ can be written in the form (A.9), when m is an arbitrary function, but if you replace this solution into (A.5), taking (A.8) into account, you just find

$$\partial_\mu m = 0 \tag{A.10}$$

thus Einstein's auxiliary equations (A.5) joined to field equation (A.3) and the theory of elementary deformations impose Bhabha's equation in ψ (with Dirac, and Klein Gordon as particular cases.

b) The field equations chosen give you in addition spherical symmetrical solution corresponding to $g_{\mu\nu}$ and $f_{\mu\nu}$ of the following form



(reference : L. Infeld and B. Hoffmann, Phys Rev. 51 - 1937. p 765)

IV. Theory of elementary particles Now we will give a definition of elementary particles (very arbitrary definition compatible with the field equations can be tried, provided provided it has the correct physical properties that is to say provided the behaviour

of the solutions at a certain approximation corresponds to known facts).

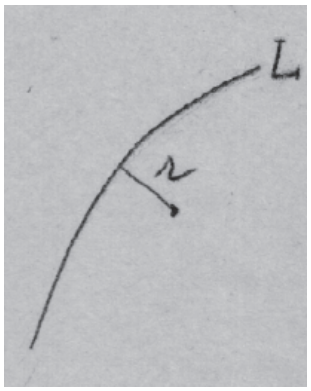
We shall write that the particle corresponds to a wave with singularity u by the expression

$$g_{\mu\nu} = \delta_{\mu\nu} + \lambda\theta_{\mu\nu}(u^\dagger, u) \tag{A.11}$$

where $theta_{\mu\nu}(u^\dagger, u)$ is the Dirac energy momentum tensor built with u.

We pose

$$u_k = (a_k + \frac{b_k}{r})\, \mathrm{e}^{i\,\theta_k/\hbar} \tag{A.12}$$



where r is the distance to the singular line L. We define the singularity by the auxilliary condition

$$\lambda\theta_{\mu\nu}(u^\dagger, u) = \lambda\theta_{\mu\nu}(\varphi^\dagger, \varphi) + \delta_{\mu\nu}\frac{2m}{r} \tag{A.13}$$

where $\varphi = a_k\, \mathrm{e}^{i\,\theta_k/\hbar}$, is what we shall call the pilot wave. We also admit that $\lambda = \left[(\varphi^\dagger\varphi)^2 + (\varphi^\dagger\gamma_5\varphi)^2\right]^{-\frac{1}{2}}$.

Because of the field equations and auxiliarry conditions (Einstein's condition) this pilote wave obeys Dirac equation. Because the metric $\dot{g}_{\mu\nu} = \delta_{\mu\nu} + \lambda\theta_{\mu\nu}(\varphi^\dagger\varphi)$ obeys also to the equation (A.4), the singularity follows the geodesics of the afore said metric, $\dot{g}_{\mu\nu}$, that is just the current line defined by $\varphi^\dagger\gamma_\mu\varphi$, as can be easily calculated.

See : Infeld and Schild Rev. Mod. Phys. 1949 : motion of test particles.

Now let us pass to the statistical point of view. Consider a set of particles having the same initial conditions follows the same line L, and has the same pilote wave φ_L; Let us construct a new wave function ψ by writing

$$\varphi_L(\mathrm{P}) = \psi(\mathrm{P})$$

on every point P of L.

Or more precisely

$$\psi_k = A_k \exp\left(\frac{i\theta_k}{\hbar}\right) \qquad \varphi_k = a_k \exp\left(\frac{i\theta_k}{\hbar}\right) \tag{A.14}$$

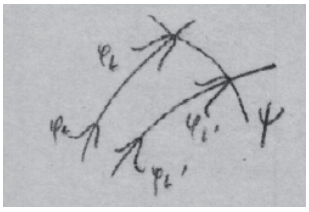
$$A_k(\mathrm{P}) = a_k(\mathrm{P}) \qquad \partial_\mu A_k(\mathrm{P}) = \partial_\mu a_k(\mathrm{P}) \tag{A.15}$$

$$\phi_k(\mathrm{P}) = \theta_k(\mathrm{P}) \qquad \partial_\mu\phi_k = \partial_\mu\theta_k \tag{A.16}$$

If that is so on every possible trajectory L, I say this wave describes the new particle statistics :

1. Because it obeys the Dirac equation
2. because, as you have shown in the paper you sent us, al least in the Newtonian approximation, any density decays into $\psi^\star\psi$

This new wave is just the generalization of the Jacobi wave, and is built from the corresponding real pilote wave φ_k, according to Huyghens principles.



Let us notice that this demonstration is quite independent from the theory of elementary deformations. I can always postulate that an elementary Dirac partice is written in the form (A.11), (A.12) and (**??**), obeying equation (A.4), $varphi$ satisfying Dirac's equation

V. Last chapter, summarizes the interpretation.

Two last remarks : A_μ corresponds to torsion, because if you displace a vector $\boldsymbol{F}$ around a [?] loop, besides the ordinary rotation, the vector $\boldsymbol{F}$ undergoes an infinitesimal displacement

$$\delta F^i = \Gamma^i pr \delta^p_x \delta^r_x$$

2) The condition $A_\mu j^\mu = m\varphi^\dagger\varphi$ is just a gauge equation, imposed by condition (A.5); You find the same in Dirac new electrodynamic theory.

Vigier says that he is ready to answer your questions. I am personally ready to transmit any letter and urge Vigier to answer.

As for your suggestion concerning a publication in Physical review, it would put Vigier in trouble if it were published before his thesis. But there is no objection for a joined publication at the end of November ; May be you could tell a little more about the content of such a publication. may be you could write a paper with the help of chapter IV, send it to us, for revision ; we then send it back to you, and it could be sent afterwards to Einstein, and the Physical review under a joined signature.

Since de Broglie's approval of the thesis as a first step towards a correct synthesis of relativity and quantum mechanics with causal interpretation, Vigier thinks that a decisive step has been made. To reach convincing experimental results, is only a matter of time.

Rough calculation on the above give Lagrangian has already given $1/130$ for the fine structure constant.

I hope all Vigier's explanation will help you in your work.

With kindest regards
Evry Vigier

A.1.20 | David Bohm à Évry Schatzman (non datée 1952)

Dear Dr. Schatzman,

Thank you for your letter, especially for your suggestion to help me get a job in Paris. However, at present, I would prefer not to do this, as I have promised to stay in São Paulo until at least Jan 1 of next year, and then expect me to stay a lot longer : They have been very good to me here in Brazil. It it true that it is isolated and the library facilities are bad are present, but the money has no been appropriated to improve them, my preferences would be as follow :

(1) To come to Europe for a visit of 2 to 3 months either in the summer or in November (about nov 15) I have plenty of money for this trip, as my salary is about $11,000 a year in dollar equivalents (which can be used in buying plane tickets) and is worth about $7000 a year if I have to buy dollars on the « gray» market (as would be necessary to cover hurry express in Europe)

(2) In about a year, I would like to come to Europe for an extended period. I also have several possibilities of working in England, a Profs. Massey in London and Mott in Birmingham have both offered me research positions. Also by then i should have saved enough money so that I could live in Europe for a long time without a formal job, if it seems best to do that.

(3)I have been told by friends in the U.S. that it may be possible to get my passport back for a specific purpose, such as visiting a scientific conference in Europe, or query a series of lectures, along perhaps with Massey + Mott in England , it would be hard for them to deny me a passport. Also Paul Robeson is now carrying on a court action in the U.S. to try to force them to return hs passport. If this is successful, I may get my passport back also.

Now a to scientific matters, unfortunately Einstein's papers on the use of semi-vectors are not yet in the library. (these back issues have been ordered lately, but will not come for some time). I would therefore appreciate it if you would explain your use of semi-vectors to me in detail. I do not yet understand your work, but I am hoping that when Schrödinger's papers and the additional explanatory materials arrive, I shall make more progress. One point puzzles me very much. A spinor (semi-vector) has 4 complex components, and therefore contains 8 independent numbers (real and imaginary). However, you start with a displacement vector, U_1, having 4 components, and then introduce a spinor Ψ, with eight numbers. The vector $U_1 = \psi^\dagger \gamma^1 \psi$, uses up only4 of these numbers. What is the meaning of the other form ?Also, what is the meaning of other spinor, φ , that you introduce ?

I would like to make a suggestion to you that may be very helpful. When, you publish your work, please remember that most physicists (like me) know little about general relativity and nothing at all about affine geometry. It will be a big surprise to

them that these can be related to atomic physics. So please try to explain everything in great detail, even those things that seem painfully obvious to you.

I need hardly add that if your work is correct, it is the first step in a scientific revolution of hitherto undreamed of dimensions. It would not only as you said, « put quantum mechanics on its feet», but it leads to exciting new [?] of interconnections in matter. I certainly hope that you would be successful, and I wish to contribute all I can in furthering its solution of this problem. I am very glad that my theory of measurement helps in this work.

I have a number of ideas, but they are in somewhat different direction from what yours appear to be. However, there appears to be a possibility of a synthesis of the two points of view, that would be superior to either of them separately. I cannot be definite at present, but I can try to outline the general line of reasoning which is guiding me.

I am working on an extension of the re-interpretation of the quantum theory to the Dirac equation. The this end, I consider the spinor field of Dirac as a really existing field, determining a sort of velocity field in space, thus :

$$\boldsymbol{V} = \frac{\psi^\star \boldsymbol{\alpha} \psi}{\psi^\star \psi}$$

The « probability density» is $\psi^\star\psi$.

The well known conservation equation $\frac{\partial \psi^\star \psi}{\partial t} + \operatorname{div}(\psi^\star \boldsymbol{\alpha}\psi) = 0$ leads to $\frac{\partial P}{\partial t} + \operatorname{div}(P\boldsymbol{V}) = 0$, thus guaranteeing conservation of probability. Now to understand the electron spin, we use a well known method, of replacing psi by $-\frac{2}{m}\left(\gamma^\mu \frac{\partial}{\partial X^\mu}\right)\psi$, which follows from Dirac's equation. We then can define the 4-vector

$$W^\mu = P\boldsymbol{V} = \psi^\star \boldsymbol{\alpha}\psi \text{for } \mu = 1, 2, 3,$$
$$W^\mu = \psi^\star \psi \text{for } \mu = 4$$

making the above substitution, we get

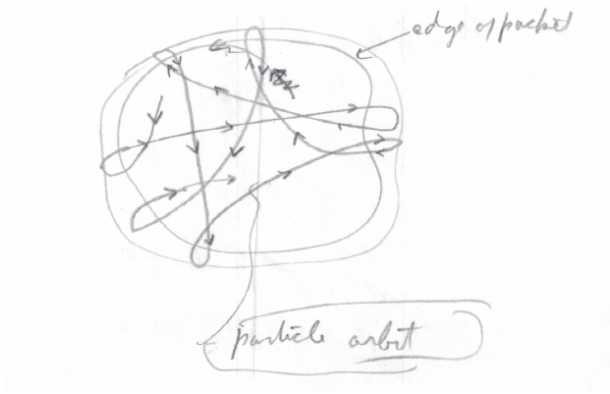
$$W^\mu = \frac{1}{2i}\left(\psi^\star \frac{\partial \psi}{\partial X^\mu} - \psi \frac{\partial \psi^\star}{\partial X^\mu}\right) + \frac{\partial}{\partial X^\nu}\psi^\star \sigma^{\mu\nu}\psi$$

where $\sigma^{\mu\nu} = \frac{\gamma^\mu\gamma^\nu - \gamma^\nu\gamma^\mu}{2}$

The first term, A, in the above equation, corresponds approximately to what would be obtained in the non-relativistic limit. It corresponds very nearly to a potential flow ($\boldsymbol{V} = \boldsymbol{\nabla} S$) and by a somewhat different split-up, one can obtain for this term exactly a potential. If we imagine a velocity field, $W^\mu(X)$, the second term, B, corresponds to circulations flow, or « vortex» motion of thus field.

If we form a wave packet (as a necessary for proper fitting of boundary conditions) the term, B, will generally be very small in the center of the packet where $|\psi|^2$ is nearly a constant, but it becomes large neat the edge, where $|\psi|^2$ changes rapidly as a function

of position. Thus, most of the circulation is neat the edge. For a particle of low momentum, the particles moves at low velocity ($W^\mu = \psi^\star \boldsymbol{\alpha} \psi$), and nearly in a straight line as long as it is non the interior region of the packet (In this interpretation, the violent Schrödinger « Zitterbewegung» is not present, unless the particle is undergoing on interaction involving large transfers of energy. When the particle reaches the edge of the packet, the circulatory term, B, describes a tendency for the particle orbit to turn ; thus.



Thus the particle orbit precesses, and this [?] rise to the so called « spin» angular momentum and the magnetic moment. Actually, there is no spin, but only a « vortex» or circulation in the velocity field.

2) We are led to the second point. You may have read Dirac article in « Nature» (about Sept.) « Is there an Ether ?» I believe that there are even strong reasons in favour of the ether than these quoted by Dirac in his paper. For quantum mechanics has show, that « empty» space a strongly fluctuating electromagnetic fields and more important still, a very high density (infinite according to the present inadequate theories) of negative energy electrons, protons and neutrons. If one adopts the new interpretation of the quantum mechanics, there is no choice but to suppose that these particles are really in existence. One therefore has been back to the old notion of a material sb-stratum filling all space. As a have said, this substratum is very dense, much denser than any other form of matter. In fact, matter as it is usually called, would bz only a disturbance in the uniform background of substratum. Light waves, etc. would also be disturbances of the substratum. The mysterious « annihilation» ans « creation» of material particles could now be understood naturally ; for with the [?] of energy, the substratum could be made non-uniform as a spreading wave. These two forms of energy could be transformed into each other when we look out at the sky, space appears to be almost empty, because light waves are scattered only by inhomogeneities in space. Similarly material particles are likewise inhomogeneities propagated freely in a uniform background. Thus, to a naive way of looking, space appears empty, a similar phenomenon appears in connection with the theory of metals. As you know, an electron will go through a very dense metal without being scattered as

long as the crystal lattice is perfectly regular. Only non-uniformities in the lattice will scatter the electron. A naive observer (for example a positivist) would conclude from this evidence that e metal consists of empty space, with a very thin haze of « matter ».

I would like to ass one point here. It is most likely that not even the sub-stratum particles could be indestructible and unanalysable. Instead, there is probably another substratum below this (of a qualitatively different kind most probably) and so on ad infinitum. Thus, we should have an infinite series of qualitatively different levels of laws. Any finite number of levels can always be understood by humanity, but never all of them. Thus, we can understand more vividly a number of dialectical principles, for example, many people are puzzled by the dialectical assertion that matter must be eternal (i.e. no creation). The answer is that at any particular level, the forms of matter as a whole, in its infinite number of properties and inter -connections is eternal. Secondly, consider the statement od dialectics that « a thing is not equal to itself ». this we understand by the [?] that a materiel « thing » contains an infinity of properties whereas the concepts usually defining what the thing « is » cover only a finite number of these properties. Thus, a thing is not only « what it is » but also a large number of other things, which will manifest themselves later ; or in other words in « what is coming to be ». Moreover, the levels not taken into account in the usual definition of the « theory » will generally produce effects that are in contradiction with the permanent existence of this « thing ». I could develop many other aspects here, but don't want to make the letter too long.I have an idea for an article on this general point, because I think it is necessary to make the meaning of dial. materialism clearer in terms of new experiences and knowledge that have been made available over the period of 50 years ; Also, I would very much appreciate seeing a copy of your article. It will probably be a long time before I publish my article, however, as I need to do a lot of thinking, and in my present precarious position, it would probably not be wise, as I could quickly be forces to go back to the States.

3) Now I shall summarize my ideas on how the substratum theory can actually be carried out. It turns out that I have been working for many years in connection with a similar problem ; i.e. the theory of highly ionized gases, or « plasmas » as they are called. On dialectical materialism principles, I was led to try to analyze these gases in terms of the opposition between two effects : (1) The electrical forces of interaction between particles which tend to produce organized behaviour of the system as a whole, and (2) the random thermal motions of the particles, which tends to destroy organization, and to produce chaos. This mode of analyses was highly successful, and led to a considerable improvement on the theory of metals. The first steps will be publish in Phys. Rev., Feb 1, but I have carried it much further since writing that article.

As the solution of the problem shows, the conflict between order and chaos leads to the following interesting behaviours :

One can define the charge density at a given point ; $P(\boldsymbol{x}) = \sum_i \delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x_i})$ where we sum over all the particles in the assembly. The Fourier component of $P(\boldsymbol{x})$ is

$$P_k = \int P(\boldsymbol{x})\, \mathrm{e}^{i\boldsymbol{kx}}\, \mathrm{d}\boldsymbol{x} = \sum_i \mathrm{e}^{-ikx_i}$$

For $k \neq 0$, P_k describes a density fluctuation of he group of particles. Now it turns out that for wave-lengths longer than a critical value λ_0, (which depends on the density of particles and the mean kinetic energy), the density, P_k, undergoes (to a high degree of approximation) simple harmonic motion, just like the Fourier coefficient of a continuous field. But for wave-lengths below λ_0, this approximation fails, and it becomes better to follow the motion of the individual particles. The general picture is like this. One can always represent an array of particles in terms of collective field-like variables. If the interactions between particles are strong enough, then for long waves these filed variables will behave almost independently like simple harmonic oscillators, but for short waves, they become so non-linear ans interconnected that the field description breaks down. however, at precisely this point, the point of view of individual particles becomes simple. I hope you will note that this is in many ways similar to what you are aiming at – i.e., singularities resembling particles at short distances. But analogy is even closer ; for the velocity of these particles is given by $V = \boldsymbol{\nabla} S(\boldsymbol{x})$ where $S(\boldsymbol{x})$ satisfies Hamilton-Jacobi equation, resembling that coming in my point of view from Schrödinger's equation. Here the idea is that perhaps the « quantum-mechanical» potential similarly represents the effects of the collectively describable aspects of the substratum which will act approximatively like a field.

This analogy goes further. A more careful treatment shows that $V = \boldsymbol{\nabla} S(\boldsymbol{x})$ is not the most general possibility in the plasma, but that more generally, we have $V = \boldsymbol{\nabla} S(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{A}(\boldsymbol{x})$.

$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x})$ is a « vector-potential» describing vortex motion, similarly, as we have seen, Dirac's equation seems to suggest vortex motion. Thus, it seems that the non-relativistic approximation corresponds to the neglect of vortex motion in the material substratum that fills all space.

These ideas have to be given a more precise form, and I have much hope that this can be done if we regard your formulation in terms of the ideas that the transformations you discuss represent distortions of the material substratum, then there might be a close relation between the two point of view , since in both, we have fields which because of non-linearities can contain particles-like regions of very high field intensity. However, I prefer the substratum point of view, because it leads to greater hope of being able to solve the non-linear operations. The reason is that in my point of view, we begin with interacting substratum particles, then deduce a set of non-linear equa-

tions representing the behaviour of the particles collectively. But since we started with particles, we know that the equations must contain the particles as solutions. The individual particle-motion is however profoundly modified by the effects of the other particles, which are best treated collectively as a field.

Finally, my idea about relativity is this : The basic ideas in relativity, which is undoubtedly sound, is that the properties of spice and time mus depend on these of matter. but the questions is « Do we know now where all the matter is.» If there is a substratum, then the substratum will be the most important determinant of the properties of space and time. Mater as we know it being only a non-uniformity in the substratum, affects the properties of space and time only indirectly ; that is only because the substratum is modified.

Please let me hear from you soon. Also, show this letter to Vigier.

Sincerely
D. Bohm

A.1.21 | David Bohm à Évry Schatzman (12 octobre 1953)

Dear Evry,

I heard that you think something can be arranged about my coming to France. I am now thinking about the matter and should come to a decision soon. Several factors seem important to me : (1) I am not certain about future developments in France. If for example, France Ok's the pact,[7] then I should not feel very reassured about coming there. (2) I want to know whether you are sure that I can ger a passport that will permit me to travel freely and which will not requires that I stay in a certain country, or just travel to that country. (3) How much time will be needed to complete the necessary arrangements ?

I am now embarrassed by the fact that Brazil has suddenly abolished the free market in [?] so that I cannot buy dollars very easily. Hence. I may have lot less money than I had [?]

My health at present is rather poor, and for this reason, I haven't gotten much work done. I badly need vacations in the mountains also, mu spirits are a bit low, as there aren't many people to talk to. I could use Vigier's unshakeable optimism (which has become proverbial here).

I am very anxious to be able to be among you people. I hope that it can be arranged in not more than 9 months to a year.

With regards to the explanations of Einstein's point of view, will you please tell me more precisely what you want. If necessary, I can write and ask him to explain just how he feels about the causal interpretation, but I hesitated to do so before I know just which features are of greatest interest to you.

Regards to all
Dave

P.S. I have stated numbering letters to the people in France. This is the first that I am numbering. However, I did send you some other letters (unnumbered) a few days ago.

P.P.S. It is my impression that letters to Vigier[8]

7. Bohm fait référence aux Accords de Madrid signés le 23 septembre 1953 entre les États-Unis et l'Espagne franquiste qui permet à l'Espagne d'intégrer le bloc occidental.
8. La lettre se termine ici.

A.1.22 | David Bohm à Évry Schatzman (22 décembre 1953)

Dec 22, 1953

Dear Evry

Thanks for your letters of Dec. 10.

My situation now is that I do have my permanent identity card. The next step would be to get citizenship here, which can be done within about 18 months, if all goes well. I anticipate however that there may be trouble next year in the US in connection with the Republican efforts to concentrate attention on the Communist issue which may result in some difficulties for me here in Brazil. However, it would be best to meet this problem when and if it comes.

I am somewhat hesitant about taking Brazilian citizenship, as I don't like Brazil as country to live in. Also Brazil is still pretty dependent on the US, although there is a steadily rising nationalist sentiment, which is anti American. Whether this sentiment will have grown enough by next year is not yet clear, however.

Please tell Vigier that my health is now a lot better and I have made some progress on the theory of the moving singularity, using some ideas of Schenberg, who is now pretty interested in our problem. I shall also now write the papers now that my old strength and vigour are returning (I hope to stay). I shall write him soon.

Your ideas on the collective behaviour of the electron gas seem correct to me. The collective oscillations will not be important in the case of the stars. You can make an estimate of their importance by counting the numbers of collective coordinates. The function of collective coordinates is of the order of $\left(\frac{r}{\Lambda_0}\right)^3$, which is equal to the ratio of the volume of a sphere of radius $\frac{1}{\Lambda_0}$ to radius $\frac{1}{r}$ where r is the mean separation of the electrons. Thus, since $\frac{r}{\Lambda_0} \sim \frac{1}{8}$, $\left(\frac{r}{\Lambda_0}\right)^3 \sim \frac{1}{500}$. This will create a negligible change in the specific heat, pressure density relation, etc.

Best wishes Dave

P.S. With Israeli citizenship, I would be safer against being brought back to the States, during the next 18 months which are critical, than I would be as a mere [?] to Brazil. What do you think ? The chief difficulty of course is that the Israel policy creates much doubt about the future of the country. On the other hand, I have heard that once you are there, it is not very hard to obtain a passport in less than 2 years, in case this should be necessary.

In this regard, Einstein simply would not want to help of course, as it is against his principles to help anyone circumvent the regular laws in [?] of any country. He doesn't

seem to like what is happening there in general either of course. On the other hand, the situation un the physics dept is becoming very unpleasant for me here. There is a long standing fight between 2 groups in the department, and both groups are continually dragging me into it. It is very unpleasant, as the fight is so vicious that each group is trying to throw the other out. So much time and energy is lost in it that one's work is seriously interfered with. This is another reason why I would hesitate to stay here another 18 months.

A.1.23 | Madame la secrétaire de Frédéric Joliot-Curie à Jean-Pierre Vigier (7 janvier 1955)

Paris, le 7 janvier 1955

Monsieur J.P. VIGIER
5 rue des Beaux-Arts
Paris

Monsieur, Monsieur Joliot me prie de vous informer qu'il ne lui sera pas possible de vous recevoir comme convenu, Lundi prochain à 11 heures. Vous pourrez le voir, le même LUNDI 10 JANVIER, mais à 14 heures, dans le bureau de Mme Joliot, à l'Institut du Radium. D'autre part, je vous prie de vouloir bien passer tout de même à mon bureau, car je devais vous remettre lundi, au moment du rendez-vous, et à la demande de M. Joliot, un document scientifique à examiner, qui lui a été confié par M. Zunino, député du Var et nous préférons vous le remettre directement. Je compte sur votre passage, d'autant que l'auteur de ce « Traité » doit passer nous voir le 17 ou 18 janvier. Bien cordialement, La secrétaire.

A.1.24 | Frédéric Joliot-Curie à G. Angerand (14 mars 1955)

Paris, le 14 mars 1955.

Monsieur G. ANGERAND
1 rue Victor Hugo
BOURGES (Cher)

Cher Monsieur,

De retour d'une cure de repos à laquelle j'ai du m'astreindre ces derniers temps, je trouve votre lettre du 12 février. Je vous prie de m'excuser de ne pas répondre plus tôt. Je suis actuellement surchargé de travail pour assurer la bonne marche de mon laboratoire et il m'est impossible de vous répondre ; je transmets votre lettre à Monsieur Jean-Pierre Vigier 5 rue des Beaux-Arts, Paris VIe qui vous répondra directement. Veuillez agréer, je vous prie, cher monsieur, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Frédéric-Joliot

A.1.25 | Frédéric Joliot-Curie à Jean-Pierre Vigier (14 mars 1955)

Paris, le 14 mars 1955.

Monsieur J.-P VIGIER
5 rue des Beaux-Arts
Paris VIe

Mon cher Vigier,

Je te transmets sous ce pli une lettre déjà ancienne d'un certain M. Angerand.

Je suis actuellement surchargé de travail et je n'ai pu prendre connaissance que très superficiellement de cette lettre. Pourrais-tu me rendre le service de répondre directement à M. Angerand ? Je l'ai prévenu que je te communiquais sa lettre. Merci et bien fraternellement, F. Joliot

A.1.26 | Jean-Pierre Vigier à Vladimir A. Fock (30 juin 1955)

Lettre originale suivie d'une traduction de Jean-Philippe Martinez

Jean-Pierre Vigier
5 rue des Beaux Arts
Paris VIe

30го июня 1955го

Глубокоуважаемый Профессор Фок,

К этому письму мы прилагаем экземпляр труда, который мы реализовали в этом году в Институте Анри Пуанкаре под руководствам Профессора Де-Брогля. Этот труд будет в дальнейшем опубликован в более подробной виде. Он будет в особенности тотален гидродинамическим описанием жидкости Дирака, подньем/тем предлагаемым Такабаязи в последних номерах и « Progress of Theoretical Physics » 1955 (Japan).

Толковане квантовой теории которое мы предлагаем, повидимому согласно с Вашим мнением, по которому каждая микрочастица облагает индивидуально волновыми свойствами которые изображаются функцией Ψ обычной теории.

Статистические свойства ансамбля микрочастицу представляют для нас следствие хаотического волнения « вакуума ».

Мы думаем, что наш труд является успевает на пути синтеза теории относительности и квантовой механике

Четырёх-мерно пространство событий Эйнштейна снабжено по нашему мнению, на микроскопическам уровне, хастическим волнением, из которого вытекают уравнения волновой механики. Обычные макроскопические уровнения были бы тогда получение, пренебрегая этим эффектом. (Таким же образом классически рассматривают газ, как сплошную жидкость когда принебрегают молекулярным волнением). Мы теперь пытаемся расширить наши заключения, доказывая что система нескольких вихрей подобных тем, которые мы ввели в нам « вакуум » удовлетворяют волновой уравненям общей теории частиц (со стинем) ?

Мы пытаемся в этой же области создать теорию взаимодействия.

Эти исследования, в случае успеха, доказали бы, что симметрические релятивистские теории достаточны, чтобы включить квантовую теорию.

Мы были бы очень счастливы, много уважаемый Профессор, знать ваше мнение об этой работе и иметь будущем случай поделиться с вами по этому поводу.

С глубоким уважением,

Ж. П. Вижье

Jean-Pierre Vigier
5 rue des Beaux Arts
Paris VIe

30 juin 1955

Cher Professeur Fock,

A cette lettre nous joignons un exemplaire du travail que nous avons réalisé cette année à l'Institut Henri Poincaré sous la direction du professeur de Broglie. Ce travail sera publié ultérieurement de façon plus détaillée. En particulier il y aura une description hydrodynamique complète du fluide de Dirac, thème proposé par Takabayasi dans le dernier numéro de « Progress of Theoretical Physics » 1955 (Japon).

Nous offrons une interprétation de la théorie quantique, apparemment conforme à votre opinion, dans lequel chaque microparticule revêt individuellement des propriétés ondulatoires qui sont dépeints par la fonction Ψ de la théorie conventionnelle. Les propriétés statistiques d'un ensemble de microparticules sont pour nous une conséquence de l'excitation chaotique du « vide ».

Nous pensons que notre travail montre des progrès sur le chemin de la synthèse de la théorie de la relativité et de la mécanique quantique.

L'espace quadridimensionnel des événements fourni par Einstein est selon notre avis, à l'échelle microscopique, l'excitation stochastique de laquelle l'équation de la mécanique ondulatoire découle. Les équations conventionnelles macroscopiques seraient alors obtenues en négligeant cet effet. (De la même façon, classiquement, on envisage un gaz comme un fluide continu lorsqu'on néglige l'agitation moléculaire).

Nous essayons maintenant d'étendre nos conclusions, en faisant valoir que le système de vortex multiples semblables à celles que nous avons mis en place dans notre « vide » répond à l'équation d'onde de la théorie générale des particules.

Nous essayons dans ce cadre de créer une théorie de l'interaction. Cette recherche, si elle réussit, prouverait que les théories relativistes symétriques sont suffisantes pour permettre la théorie quantique.

Nous serions très heureux, très respecté professeur, de connaître votre opinion sur ce travail et de partager lors d'un événement futur avec vous à ce sujet.

Cordialement,

J. P. Vigier

A.1.27 | Vladimir A. Fock à Jean-Pierre Vigier (8 septembre 1959)

A Monsieur J. P. Vigier
Cher Collègue !

Je vous envoie le texte de ma conférence du 29 juin à l'Institut Henri Poincaré, dans l'espoir qu'il peut vous être utile pour mieux connaître et mieux comprendre mon point de vue sur la mécanique quantique.

En même temps, j'envoie ce texte (intitulé « Sur l'interprétation épistémologique de la mécanique quantique») à Mme Tonnelat et à M. Costa de Beauregard qui ont l'intention de le publier dans les Travaux de l'Institut Henri Poincaré et dans la « Dialectica».

J'ai donné ma permission de publier mon article dans la « Dialectica», car je ne trouve rien de mauvais ou d'inadmissible qu'un article exposant les idées de la philosophie réaliste et matérialiste soit publié dans une Revue qui est en général réactionnaire et idéaliste. Je pourrais citer comme exemple l'article « Sur la co-existence paisible» qui vient d'être publié par N. Krouchtchev dans la revue américaine « Foreign Affairs». Si c'est admissible dans le domaine politique, c'est d'autant plus admissible dans le domaine scientifique. D'ailleurs la « Dialectica» a d'autres lecteurs que les revues de gauche.

En espérant que nos différences d'opinion sur la mécanique quantique ne nuiront jamais à nos relations personnelles, je vous prie d'agréer l'expression de mes sentiments distinguées

V. Fock
Le 8 septembre 1959
Léningrad, 164, Institut de Physique de l'Université.

A.1.28 | Jean-Pierre Vigier à David Bohm (17 mai 1962)

Kyoto May 17th 62

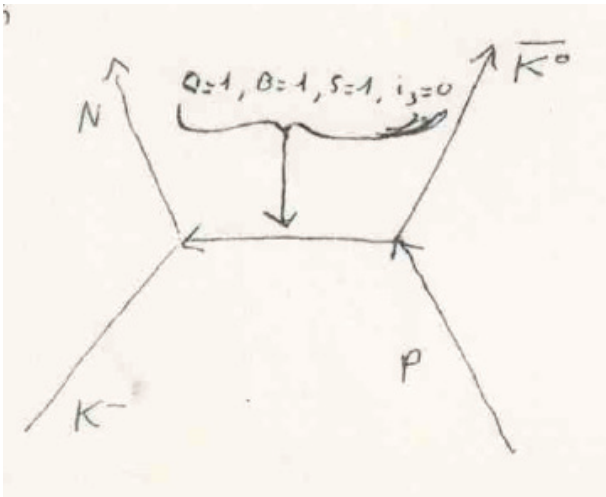
Dear Dave

Thanks for your letter. I'm sorry of the delay for answering but such important work has turned up I wanted to wait a few days before writing.

This time I think we're in and for good. This for two reasons.

A/ As I arrived here and exposed the rotator Theory Yukawa became very excited and started working to deduce consequences from the model.

A first prediction is clear. Our baryon table implies the existence of a new triplet $Y^{++}\ Y^{+}\ Y^{0}$ with $Q = 2, 1, 0\ S = 1\ B = 1\ i_3 = 1, 0 - 1$. Such a Y^{+} particle can evidently appear as a $\mathrm{K} - \mathrm{p}$ resonance in the graph



and we sent a letter to the Phys ; Rev. to that effect.

Now Moglié has turned up yesterday (out of Berkeley) with a sensational information. Ferro-Luzzi and al ; (see Phys. Rev. Letter January 62) have just discovered such a particle in the K^{-}-p scattering resonance corresponding to $m_{Y^{+}} \cong 1500\mathrm{Mev}$;

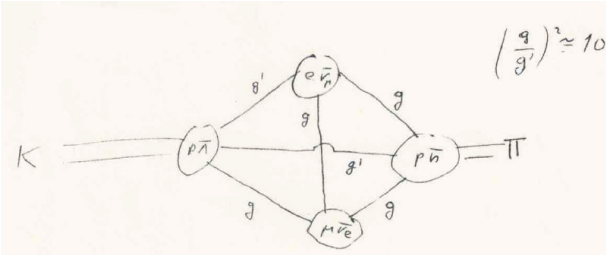
Alvarez has been so disturbed by this that they have decided to keep the whole thing secret for the moment (also to give the theoretical people there a good start) because of its revolutionary consequence (it means the end of the Nishijima–Gell–Mann scheme).

Since this is an immediate consequence of out stuff no need to worry.

B/Starting from paper II we have developed the weak interaction theory with intermediate vector mesons and have derived the scheme

which results from current-current coupling associated with exchanges of our weak vector (Yang Mill like)

Now it can be shown (a detailled letter will follow) that



a)This fits with all know facts including the $\Delta Q = \pm\Delta S$ Fry result

b) It predicts that the Brookhaven neutrinos yield only muons which is still an unconfirmed rumor.

This si so important that Yukawa ha asked me to stay until the end of June were we shall have definite confirmation. I'll let you know at the beginning of June at what date I propose to go to London. I'm writing tomorrow to Eric.

Naturally please keep all this strictly to yourself since any leak would be bad before publication. Yukawa has on this a smile all around his face and I am dancing like the Phoenix bird (a well known Japanese animal) since this is it Hurrah for us !!

Love to Sarah
as ever
Jean-Pierre

A.1.29 | Jean-Pierre Vigier à David Bohm (non datée 1962)

Dear Dave,

I've just arrived from Japan over India and Israël and find your letters of April 17 and June 26.

I'll just answer them briefly since I want to send you a long letter in a few days.

a) Yukawa is going to London at the end of August to attend the Pugwash Conference organized by Powell. He has asked me to go over to see him so we can discuss all together the latest developments ; If you are in England by then i think it would be very useful we could all three meet together perhaps in the first days of September. I am going anyway naturally since we have to look over the proof of a joint paper we are publishing in the Progress ;

b) have you any news of our Phys-Rev papers ? When are they coming out ? De Broglie and i are very anxious they should come out as soon as possible. Have you corrected the proofs ?

If you haven't received them yet de Broglie, Takabayasi and myself suggest you should introduce somewhere un paper 1 or a footnote indicating as a possibility the modification of classification suggested in the paper I sent (on the new possible resonances).

c) naturally $S = 1$ $B = 1$ is possible in the Gell-Mann scheme if you don't make any assumption on the group theoretical nature of S? But if following Pientk and d'Espagnat you introduce $\mathrm{O}_4(++++) = \mathrm{SO}_3 \times \mathrm{SO}_3{}'$ where SO_3 and $\mathrm{SO}_3{}'$ are 3–dimensional real rotation groups and assume invariance under SO_3 implies I_3 conservation and invariance under $\mathrm{SO}_3{}'$ implies $Y = \frac{S}{2} + \frac{B}{2}$ conservation. You exclude $S = 1$, $B = 1$. This is important since the new particles, if they are definitely proved, exclude the possibility of four dimensional euclidean isobaric spin space.

When you answer please write at the following address

18 Villa Seurat Paris 14

Since the Institute will be closed in August.

I rejoice to see you both soon
as ever
Jean Pierre

P.S. New favorable indications ou our particles are filtering. V^+ has a mass $1480\mathrm{Mev}$.

A.1.30 | Évry Schatzman à Georges Cogniot, non datée

E. SCHATZMAN, 101 rue de Miromesnil
au Camarade Georges COGNIOT

Mon cher Georges,

Je voudrais te rendre compte en quelques mots de mon voyage à Varsovie et à Prague. A Varsovie, la session de l'Académie Polonaise des Sciences était extrêmement intéressante, mais ce qui a été peut-être encore plus intéressant, ce sont les rencontres avec les physiciens. En premier lieu, j'ai pu discuter avec Fok (Léningrad) sur les problèmes de mécanique quantique et de relativité, je lui ai raconté ce que nous faisons dans notre petit cercle de physiciens communistes, et cela l'a beaucoup intéressé. Je l'ai ainsi mis au courant de l'état d'avancement de nos discussions sur les fondements de la mécanique quantique et de la relativité ; en retour, j'ai reçu l'impression encourageante que nous étions sur la bonne voie et que notre organisation et nos méthodes de travail étaient bonnes.

La rencontre avec le camarade (dont je ne sais pas le nom) responsable auprès du C.C. Polonais a été l'occasion pour elle de m'interroger sur le problème suivant : est-ce que la coopération sur le plan idéologique avec les savants honnêtes paie sur le plan politique ? Je lui ai affirmé que notre expérience des cercles montre que cette politique est payante, et j'ai raconté à ce propos l'histoire de l'Académie des Sciences Européenne et de Louis de Broglie. J'ai eu aussi l'occasion de faire connaissance de Fiedler et de Dlouiski. La rencontre avec Infeld a aussi été particulièrement intéressante, et j'ai pu constater que le sens des travaux menés en France par Vigier lui avait échappé ; j'ai don pu lui expliquer le sens que présentait ces travaux et la liaison profonde qu'ils ont avec ses propres idées ; il a insisté pour que nous le tenions au courant de ce que nous faisons.

A la session Copernic, j'ai défendu l'idée de l'infini de l'Univers avec des arguments tirés de l'article en cours de publication dans « Question de Cosmogonie », et j'ai eu le plaisir de constater que ces idées provoquaient l'intérêt chez Fok et chez Chou Pei Yuan.

En Tchécoslovaquie, où j'ai été invité à faire deux conférences, l'une pour les astronomes et physiciens (sur les processus nucléaires dans les astres) et l'autre à la société astronomique tchèque (sur la critique des cosmogonies répandues en Occident), j'ai également pu rencontrer astronomes et physiciens. Chez les physiciens, j'ai également pu expliquer l'état d'avancement des travaux de Vigier, et expliquer pourquoi nous ne pensions pas que ces travaux présentaient une explication mécaniste de la mécanique quantique ; chez les astronomes, la critique de la théorie dite de l'expansion de l'Univers a provoqué la demande d'envoi d'une copie de mon travail pour « Questions de Cosmogonie » au Cabinet de Philosophie de l'Université de Prague, où ils seraient

heureux de discuter et de me faire part des résultats de la discussion.

De façon générale, j'ai été frappé de voir que notre niveau idéologique en physique et cosmogonie n'était pas inférieur à celui de nos amis de Pologne et de Tchécoslovaquie. Le désir de mes collègues, communistes ou non, d'avoir des relations culturelles suivies avec la France (mais pas avec n'importe qui en France !) m'a profondément touché. Mais ce qui soulève l'enthousiasme , c'est la puissance des moyens mis à la disposition des savants, malgré les problèmes soulevés par le relèvement des ruines de la guerre et du capitalisme et l'édification du socialisme : leçon de courage et d'espoir.

A.2 | Documents

Les documents ci-dessous sont une sélection des différents procès verbaux de l'enquête consécutive à l'arrestation de Jean-Pierre Vigier du 18 avril 1942 au poste de frontière franco-suisse de Moillesulaz, en raison des documents de propagande antifranquiste trouvés dans le cadre de sa bicyclette. Ils mettent en lumière le déroulement de l'enquête. Ils sont extraits des archives du ministère de l'intérieur, 2015/3 MI 1 : dossier n° 419.827 Jean-Pierre Vigier (1942-1968).[9]

A.2.1 | Procès-verbal, Moillesulaz, 18 avril 1942

État Français
Moellasulas, le 18 avril 1942
L'Inspecteur Principal de la Police Nationale GENTIL
Chef de Poste à Moillesulaz
à Monsieur le Commissaire Principal
Chef des services des renseignements généraux

Copie à Monsieur le
Sous préfet à Saint-Julien

Objet : découverte de tracts communistes importés en France par VIGIER Jean-Pierre, sujet Français, demeurant à Genève.

J'ai l'honneur de vous rendre compte, que ce jour, vers seize heures, s'est présenté à notre poste frontière, venant de Suisse et disant se rendre à Nîmes (Gard), le nommé VIGIER Jean-Pierre, âgé de 22 ans, étudiant, de nationalité française, domicilié à Genève, 24 chemin des Roches, né le 20 janvier 1920 à Paris. Celui-ci était porteur d'un passeport français n°480, délivré à Genève, le 6 Novembre 1940, renouvelable le 20 novembre 1941, et valable jusqu'au 19 novembre 1942, portant un visa du Consul de France, à Genève, en date du 20 Novembre 1941, pour un nombre illimité de voyages en France jusqu'au 19 novembre 1942.

J'ai été avisé par M. le Receveur des Douanes du poste de Moillesulaz, qu'en procédant à la visite de la bicyclette, sur laquelle circulait le jeune homme, que les préposés PINOL et CHENEVIER, avaient découvert, dissimulés dans un tube en fer, placé lui-même dans le tube de soutien de la sell, les imprimés dactylographiés rédigés en langue espagnole et en langue anglaise.

Ces imprimés ont toute l'apparence de tracts communistes et républicains, destinés vraisemblablement pour la propagande révolutionnaire en Espagne ou peut être aussi pour la propagande communiste auprès de réfugiés politiques en France.

9. État Français - Gouvernement de Vichy, Arrestation de Jean-Pierre Vigier, Rapports de police.

La visite à corps très approfondie n'a amené aucun autre résultat, ni elle de ses bagages qui contenaient seulement un livre rédigé en anglais.

Le susnommé a déclaré, en outre, qu'il se rendait à Nîmes, chez son grand-père, M. DUPUIS Paul, docteur, Villa des Charmilles, Impasse des Trois Fontaines, à Nîmes (Gard).

Conformément à vos instructions, j'ai fait diriger VIGIER, en compagnie d'un inspecteur du poste, au commissariat Spécial d'Annemasse, où j'ai fait transporter également les écrits qui avaient été saisis.

L'inspecteur Principal, Chef de Poste

A.2.2 | Procès-verbal, Montpellier, 21 avril 1942

ÉTAT FRANÇAIS
MONTPELLIER, le 21 avril 1942
L'inspecteur Principal de Police Judicaire PAGES Jean,
à Monsieur le COMMISSAIRE DIVISIONNAIRE Chef du service régional de Police Judiciare
à MONTPELLIER

n° 2973
Renseignements sur le
nommé VIGIER Jean-Pierre

j'ai l'honneur de vous rendre compte du résultat des investigations auxquelles je me suis livré, ce jour, à Montpellier et banlieue, concernant le nommé VIGIER Jean-Pierre, né le 16 janvier 1920, à Paris, arrêté à la frontière suisse pour détention de tracts communistes, trouvé dans ses bagages, motivant une demande de renseignements par téléphone, en date du 20 avril courant, de l'Inspection générale – 2eme section – à Vichy.

Le susnommé n'aurait fréquenté l'association catholique du Groupe Montalembert, sis rue de la Providence, à Montpellier que très peu de temps, durant l'année 1941. Il allait dans cet établissement avec ses camarades, pour réviser ses cours.

D'après l'entretien que j'ai eu avec l'Aumonier, VIGIER serait un athée, d'en caractère renfermé et ce n'est donc pas par déisme qu'il se rendait dans cette association. VIGIER était en effet inscrit à l'Université de Montpellier, depuis 1939. De cette année de 1941, il a été excellemment noté. Ses professeurs le présentent comme ayant été un de ses meilleurs étudiants. Il prenait pension de temps à autre chez Mme GUIBAL, Villa des Argentines, 34 rue Marcel de Serres, mais il n'est pas connu au n°72 de

l'avenue de l'Agriculture, ni aux numéros des immeubles adjacents. A ladite pension, VIGIER n'aurait jamais attiré l'attention par des propos communistes ou défaitistes. Cet étudiant se rendait souvent à Nîmes où résident les parents de Jacques Dupuy. Ce dernier est actuellement dans un Chantier de Jeunesse, et tous deux suivaient les cours de l'Université de Montpellier.

D'après les renseignements recueillis auprès des anciens camarades de VIGIER, il n'aurait jamais fréquenté des personnes aux nouvelles institutions et selon les assertions de son ami particulier DELON Robert, fils du docteur en médecine, habitant 9 P_ace Chabaneau, le susnommé se rendait seulement de l'Université à sa pension pour travailler assidument.

En résumé, en dehors de son caractère peu exubérant les renseignements les renseignements recueillis sur le compte de VIGIER ne luis ont pas défavorables.Il ne m'a pas été possible d'établir s'il était affilié à des associations occultes.

L'inspecteur Principal de Police Judiciaire
Signé : PAGES J.

A.2.3 | Interrogatoire de Jean-Pierre Vigier, Vichy, 21 avril 1942

Quarante deux Vingt et un avril

Pierre SIRINELLI, Commissaire judiciaire, VICHY

vu les instructions de Monsieur le commissaire de police judiciaire, chef de la 2e Section de l'Inspection Générale des services de Police judiciaire à VICHY ;

mandons et entendons comme suit le sieur VIGIER Jean-Pierre, né le 20 janvier 1920 à Paris-Ve, fils de Eugène Henri et de DUPUY Françoise, étudiant à la Faculté de Montpellier et à l'Université de Genève, domicilié à Genève chez ses parents, 5 avenue Bertrand.

« Mon père, fonctionnaire retraité de la S.D.N., habite Genève depuis une vingtaine d'années. J'ai résidé dans ma famille jusqu'au mois d'octobre 1938 et j'ai fait mes études secondaires à Genève. J'ai obtenu les deux baccalauréats Mathématiques et Philosophie à Grenoble et à Annecy. En 1938, je me suis fait inscrire à la Sorbonne, où, dès la première année, j'ai passé mon certificat de mathématiques générales, du P.C.B. et des sciences physiques naturelles. J'habitais à ce moment à la cité universitaire, 9 Bd Jourdan à Paris (XIIIe) À la déclaration de la guerre, je suis allé à NIMES, au Lycée National, où j'ai préparé, sous la discipline de Monsieur HENNEQUIN, en classe

de Mathématiques spéciales, l'entrée à l'École Normale Supérieure et à l'école Polytechnique. J'étais externe et j'habitais chez le Dr CABOUAT chirurgien à l'hôpital de Nimes au 5 rue Démians. À la fin de l'année j'ai présenté les concours des deux écoles que le préparais. J'ai été refusé à l'École Polytechnique et admissible à l'écrit de l'École Normale Supérieure. J'ai obtenu une bourse de licence que ne n'ai pas utilisée. En 1940, j'ai été mobilisé dans les Chars d'Assaut , au 504 R.C.C. à Valence, où j'ai eu comme chef le Capitaine BERNELLE, dans le civil professeur de lettres.

J'étais admis à suivre les cours des R.O.R à Angoulême et en attendant je préparais ceux de mes camarades qui voulaient passer ce concours d'entrée , en mathématiques. Lorsque les événements de juin 1940 sont intervenus, ma formation a été repliée sur MIREBOIX (Ariège) et le 1er aout, j'étais incorporé dans un groupement des Chantiers de Jeunesse à FOIX. C'est à ce moment là que j'ai passé l'oral de l'école normale supérieure à Toulouse. Puis ayant contracté un rhumatisme cardiaque, j'ai terminé mon temps dans les chantiers de jeunesse à l'hôpital, successivement à Toulouse, puis à FOIX, plus spécialement à Benac. Je suis parti en congé libérable au mois de décembre 1940 et au mois de janvier 1941 j'étais démobilisé. À cause de mon état de santé, les médecins m'ont interdit de donner suite à mon projet de continuer à préparer les grandes écoles. J'ai pris 15 jours de convalescence dans ma famille en Suisse puis je suis retourné en France au début de mars pour achever ma licence. Je me suis installé à Montpellier, 75 avenue de l'école de l'agriculture au mois de juin. J'ai passé mon certificat de calcul différentiel et au mois d'octobre ceux de mécanique rationnelle et de physique générale : ce qui fait que maintenant je suis à la foi licencié en physique et en mathématique. Au début du mois de novembre 1941, je suis retourné en Suisse où je me suis fait inscrire à l'université de Genève après que l'on m'eut accordé l'équivalent de la licence suisse. Je suis les cours de doctorat. Le certificat d'astronomie étant l'équivalent du diplôme d'étude supérieurs, j'avais décidé de présenter au mois de juin prochain ce certificat devant la faculté de Montpellier. C'est pourquoi je faisais de fréquents déplacements de Genève dans cette ville, d'abord pour me tenir au courant du programme et pour suivre la marche générale des études, et en même temps pour une question de bibliographie qui me gênait assez en Suisse

D. Combien de voyages avez vous ainsi fait à Montpellier depuis Novembre 1941 ?

R. Trois. Un le 5 décembre, un le 5 janvier et un le 25 février. J'ai également fait huit jours de ski en mars à Megève et à Chamonix. Le 18 avril 1942 ma mère m'accompagne jusqu'à la frontière suisse de Moillesulaz. Au moment des formalités douanières, un des préposés m'a demandé s'il n'y avait rien dans mon « vélo », et sur ma réponse négative, il a procédé à une visite de ma bicyclette. Toute l'opération s'est passée à quelques mètres de la frontière suisse et comme cet agent me tournait le dos, j'aurais pu en toute facilité fuir et regagner la Suisse.

D. Aviez vous déjà vu le tube de fer découvert dans votre bicyclette et qui contenait des documents communistes ?

R. Jamais

D. Comment vous expliquez vous sa présence dans votre bicyclette ?

R. La seule explication que je puisse trouver est que mes voyages en France étant largement connus dans les milieux universitaires, quelqu'un a eu l'idée d'utiliser mes déplacements pour me faire transporter des documents à mon insu.

D. Où entreposiez-vous votre bicyclette lorsque vous vous trouviez à Genève ?

R. La nuit, dans le garage collectif de la maison ; et le plus souvent dans la journée. Chaque locataire de la maison a accès dans cette pièce, et le garage est d'ailleurs très souvent ouvert à l'extérieur.

D. Avez vous appartenu à un parti politique quelconque ?

R. Jamais

D. Parmi vos relations, à l'Université ou sur les terrains de sport, ou même parmi vos relations tout court, voyez vous quelqu'un qui aurait pu profiter de vos déplacements en France pour vous faire transporter les documents trouvés dans le cadre de votre bicyclette ?

R. Je n'ai aucune accusation précise à formuler, mais en cherchant bien, je vois qu'un de mes camarades d'équipe de Basket-Ball, dont on m'a dit qu'il était sympathisant communiste. Il s'agit de STEPHEN qui est étudiant à Genève, et inscrit comme moi à la S.S.U. (Société sportive universitaire). Je puis vous donner un signalement de lui : environ 1m 85, corpulence moyenne, allure sportive, cheveux châtain clair, yeux clairs, taches de rousseur sur le visage, porte un imperméable gris. Je ne sais rien d'autre de lui.

D. Je vais vous poser une question précise. Réfléchissez avant de répondre : on peut expliquer facilement, en admettant votre thèse, que le tube de métal ait été inséré à votre insu dans le cadre de votre bicyclette, mais s'il en est ainsi, de quelle façon aurait pu procéder le destinataire de cet envoi pour retirer les documents de leur cachette ?

R. À mon avis, comme j'avais parlé de la consigne de la gare d'Annemasse où j'ai l'habitude d'entreposer ma bicyclette, la personne qui avait décidé de se servir de moi comme intermédiaire devait savoir parfaitement qu'il n'y a aucune surveillance dans ce service et que n'importe qui, surtout au moment de l'arrivée des trains où le préposé à la consigne va ramasser les billets à la sortie des voyageurs, peut pénétrer en toute tranquillité et sans être pressé par le temps, dans le local où sont placés les bagages mis en consigne. Comme j'avais bien dit à mes camarades que la bicyclette ne me servait qu'à aller jusqu'à Annemasse, il ne peut être question d'un transport des documents

plus loin que cette ville. Ma bicyclette a toujours été laissée à la consigne d'Annemasse, et si j'avais été au courant des documents qu'elle contenait, je n'aurais pas laissé ma machine à Annemasse, ville très surveillée par la Douane, mais je l'aurais prise avec moi jusqu'à Montpellier ou plutôt à Nîmes, où j'aurais effectué le démontage tout à loisir et sans courir le risque de me faire surprendre par la police ou les douaniers.

D. Avez-vous autre chose à ajouter ?

R. Non, sinon que je suis parfaitement innocent, et que mon attitude n'a jamais été celle d'un coupable. J'aurais d'abord pu retourner en Suisse très facilement pendant la vérification de ma bicyclette. Je fais confiance à l'enquête de police pour vérifier l'exactitude de mes déclarations. Je vous remets les adresses de plusieurs de mes camarades, avec lesquels je suis en relations tant en Suisse qu'en France. Je n'ai rien d'autre à ajouter, et j'attends sans crainte le résultat des investigations qui seront faites à mon sujet.»

Lecture faite, persiste et signe ;
Le commissaire de Police judiciaire :

MENTION Annexons au présent deux listes, numérotées un et deux, à nous remises par le sieur VIGIER Jean-Pierre

Le commissaire de police Judiciaire.

A.2.4 | Procès-verbal, Vichy, 22 avril 1942

PROCES-VERBAL

L'an mil neuf cent quarante deux le vingt-deux avril

Nous RICHIER Georges, commissaire de police judiciaire, à l'inspection générale des services de police criminelle (Direction générale de la Sûreté nationale) à Vichy. Officier de police Judiciaire de monsieur le procureur de la République.

Vu l'arrêté d'internement pris par le Ministre de l'intérieur en date du 18 avril 1942 contre le nommé VIGIER Jean-Pierre né le 16 janvier 1920 à Paris, en application du décret du 18 novembre 1939, relatif aux mesures a prendre contre les individus dangereux pour la Défense nationale ou la sécurité publique (Mod. Par la loi du 15-11-1941)

Faisons comparaître devant nous, à 18 heures, le nommé VIGIER Jean-Pierre, auquel nous signifions l'arrêté ci-dessus indiqué. Nous l'avisons qu'il est astreint à résider à l'Hôtel BELLEVUE à Vichy.

Le sieur VIGIER déclare sur l'interpellation : « Je reconnais que cette arrêté s'applique bien à moi en tant qu'identité».

Nous avons remis l'ampliation de l'arrêté du 18 avril 1942 le concernant à M. VIGIER Jean-Pierre, qui, après lecture faite du présent procès-verbal a déclaré persister, nous donner décharge et signer avec nous

Dont acte,

Le commissaire de Police Judiciaire.

A.2.5 | Procès-verbal, Vichy, 25 avril 1942

VICHY, le 25 avril 1942

Le Commissaire de Police Judiciare

Georges RICHIER

à Monsieur le COMMISSAIRE, chef de la 2ème Section
à l'inspection Générale des services de Police Judiciaire.

J'ai l'honneur de vous faire connaître ci-après, les renseignements que le service Régional de Police Judiciaire de Montpellier et le Commissariat Spécial d'Annemasse viennent de nous faire parvenir téléphoniquement concernant le sieur VIGIER Jean-Pierre, né le 17 Janvier 1920 à Paris (5°), demeurant à Genève, 5 rue Bertrand, et dans la bicyclette duquel on avait découvert des documents à caractère communiste.

Les meilleurs renseignements on tété recueillis à Montpellier sur M. VIGIER, qui est inscrit à la Faculté des Sciences de cette ville. Son attitude politique n'a jamais donné lieu à aucune remarque et on ne lui connaît dans cette ville aucune fréquentation avec les milieux d'extrême gauche.

Une enquête a été diligentée en Suisse, par les soins du Commissariat Spécial d'Annemasse. La famille de M. VIGIER est très honorablement connue à Genève. M. Eugène-Henri VIGIER est fonctionnaire français à la S D N, et jouit de ce fait de l'immunité diplomatique. M. VIGIER Jean-Pierre est inscrit comme étudiant à l'Université de Genève, il n'est lié à aucun mouvement politique et le seul groupement dont il fasse partie est une société à caractère historique et philosophique, dont sont membres de nombreux professeurs et étudiants de l'Université de Genève. À aucun point de vue les relations de M. VIGIER ne sont suspectes et ses professeurs le dépeignent comme « un étudiant de haute valeur et de grande conscience morale ». La famille de M. VIGIER, qui a été mise au courant de la détection administrative de M. VIGIER a été extrêmement surprise ; Elle a déclaré se porter garant de l'innocence et de l'attitude politique de M. VIGIER. Précisons enfin ; que le commissariat spécial d'Annemasse a indiqué que M. VIGIER père aurait manifesté l'intention de faire intervenir certaines personnalités vichyssoises, en vue de la levée rapide de la mesure d'internement prise contre M. VIGIER Jean-Pierre.

Le commissaire de police Judiciaire

A.2.6 | Procès-verbal, Vichy, 26 avril 1942

VICHY 26 avril

Le Commissaire de police SIRINELLI
à Monsieur le COMMISSAIRE DE POLICE
JUDICIAIRE, Chef de la 2° Section

J'ai l'honneur de vous rendre compte de ce qui suit :

Le 18 avril courant, au poste frontière de Moillesulaz (Hte-Savoie), alors qu'il venait faire apposer sur son passeport le visa d'entrée en France, le jeune VIGIER Jean-Pierre, qui arrivait de Genève et se dirigeait sur Annemasse à Bicyclette, était interpellé par le douanier de service, qui eut l'idée de contrôler sa machine.

Cette visite devait amener la découverte d'un cylindre de métal, composé de deux compartiments clos par des bouchons filetés et inséré dans le cadre, sous la selle, où il était maintenu par des ressorts placés à ses deux extrémités et destinés à empêcher qu'un ferraillement eût pu trahir sa présence. Une tige guide permettait de retirer le cylindre de son logement.

Les deux compartiments contenaient des documents rédigés en espagnol, qu'un premier examen devait tout de suite révéler comme se rapportant aux questions communistes, cependant qu'un lettre transmissive, écrite en anglais et qui n'apporte d'autre lumière sur cette affaire que de permettre de supposer qu'il s'agit de papiers en provenance du Mexique via la Suisse, accompagnait cet envoi. Cette lettre est signée : Juanita. Rien ne permet, dans l'état actuel de l'enquête, d'établir l'identité de l'expéditrice.

Dès ses premiers interrogatoires, tant au poste de Moillesulaz qu'au commissariat d'Annemasse, et ensuite à l'inspection Générale des Services de Police judiciaire à Vichy où il devait être transféré pour un complément d'enquête, VIGIER ne s'est à aucun moment départi de la ligne adoptée par lui depuis le début : il affirme n'être en rien au courant de la présence du cylindre aux documents dans le cadre de sa bicyclette, et n'avoir que de vagues indices sur l'individu qui aurait été à même de machiner de système de transmission, dans lequel il n'aurait joué qu'un rôle de courrier involontaire.

VIGIER Jean-Pierre est né le 16 janvier 1920 à Paris-V°, de Eugène Henri et DUPUY Françoise. Il est inscrit à la Faculté des Sciences de Montpellier en même temps qu'à l'Université de Genèv. Il est habituellement domicilié chez ses parents 5 avenue Bertrand à Genève. Selon ses déclarations, il était en route pour se rendre à Montpellier lorsqu'il a été arrêté. Le motif de son voyage serait uniquement d'ordre universitaire.

Gardé à vue au Commissariat spécial d'Annemasse, en conformité avec les dispositions de la circulaire 240 pol. Directeur Général Adjoint, du 17 Mars 1942, Vigier était conduit à Vichy, le 20 avril, pour y être interrogé par des fonctionnaires du service central de la police judiciaire.

VIGIER déclare ne pouvoir donner, lui-même, aucune explication au sujet de la découverte qui a motivé son arrestation. Il demeure chez ses parents à Genève et son activité est purement scolaire, à l'exclusion de toute préoccupation d'ordre politique. Son père, haut fonctionnaire retraité de la Société des Nations, habite Genève depuis une vingtaine d'années.

VIGIER qui apparient à la S.S.U. (société sportive universitaire de Genève), pratique assidument le Basket-Ball. C'est à l'occasion des séances d'entraînement de son club qu'il entre en relations avec des étudiants, appartenant à d'autres branches universitaires et dont il ignore absolument la vie privée et les activités extra-scolaires.

Comme il ne fait aucun mystère de ses voyages en France, il suppose que ses fréquents déplacements ont été signalés par un de ses camarades de sport à l'organisation révolutionnaire clandestine, qui a décidé de les utiliser « sans lui demander son avis ». Le même étudiant aurait sans aucun doute chargé de se renseigner sur la date du premier voyage de VIGIER en France.

La bicyclette dont la visite a provoqué son arrestation est ordinairement garée dans un local extérieur, dans la maison qu'il occupe avec ses parents. Les divers locataires de l'immeuble ont un accès dans ce garage, ainsi d'ailleurs que les personnes étrangères. VIGIER se sert aussi de sa bicyclette pour se rendre au terrain de sports où il pratique le basket-ball, et l'étudiant dont il suspecte la participation dans cette histoire de transport de documents, aurait toute latitude pour procéder à l'introduction de ceux ci dans le logement où ils ont été découverts.

VIGIER fait connaître qu'il avait, à diverses reprises, révélé à ses camarades de jeu qu'il avait l'habitude d'aller prendre le train pour Montpellier à la gare d'Annemasse, et qu'il laissait toujours sa bicyclette à la consigne de cette ville. Il donne cette indication comme pouvant utilement orienter les recherches sur le lieu où les documents devaient être retirés de leur cachette.

Les renseignements recueillis sur VIGIER et sur sa famille leur sont entièrement favorables, tant à Montpellier qu'à Genève. L'attitude politique de VIGIER n'a donné lieu à aucune remarque et on ne lui connaît aucune fréquentation dans les milieux d'extrême gauche. La famille VIGIER est très honorablement connue à Genève, où elle est installée depuis longtemps, et où M. VIGIER père, fonctionnaire français de la S.D.N. compte de nombreuses relations dans le monde diplomatique et universitaire.

En conclusion, rien dans l'état actuel de l'enquête, ne permet d'établir que VIGIER

est coupable d'avoir sciemment introduit des documents à caractère communiste sur notre territoire. AU contraire, plusieurs détails militent en faveur de son innocence, comme par exemple le fait que, lors de la visite de sa bicyclette, il ne se trouvait qu'à quelques mètres de la frontière suisse et n'avait qu'à s'y réfugier pour échapper aux poursuites de la loi française.

Par ailleurs, une circulaire, en date du 1er septembre 1941, du service central de la police judiciaire, signale notamment que, selon les instructions du Comité central clandestin du parti communiste, les transports de tracts ou de documents intéressants la propagande sont réalisés très souvent par des jeunes sportifs qui n'appartiennent pas aux organisations révolutionnaires et qui, par conséquent, ne peuvent être suspectés.. Ainsi, les militants d'une organisation (communiste) du département de la Marne, utilisaient comme intermédiaire inconscient, pour réaliser le transport de documents et de tracts destinés à une région voisine, une des joueuses d'une société catholique de basket-ball.

Tout paraît indiquer que nous nous trouvons en présence d'une situation analogue, et il me semble utile d'orienter les recherches dans le sens indiqué par VIGIER lui-même, c'est dire à défaut d'une enquête dans les milieux sportifs universitaires de Genève, parmi les employés de la gare d'Annemasse qui sont susceptibles de recevoir, par le moyen indiqué ci-dessus, la correspondance de Suisse.

Le commissaire de police judiciaire.

Annexe B

Conventions d'écriture

B.1 Vecteurs et tenseurs

Afin d'alléger les écritures, la convention de sommation d'Einstein est appliquée sur les coordonnées. Selon cette convention, les indices répétés situés en bas (désignant les grandeurs covariantes qui varient comme les vecteurs de la base lors d'un changement de repère) et en haut (désignant les grandeurs contravariantes qui varient dans le sens inverse des vecteurs de la base lors d'un changement de repère) sont sommés.

B.1.1 Cas galiléen

Dans l'espace euclidien, les composantes des vecteurs sont repérées par des lettres latines (i, j, k, etc.) qui varient de 1 à 3. Les quantités vectorielles sont notées en **caractères gras** et les scalaires en texte simple :

$$\boldsymbol{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} \tag{B.1}$$

Produit scalaire et métrique

Le produit scalaire entre les vecteurs $\boldsymbol{u}$ et $\boldsymbol{v}$ s'écrit d'après la convention d'Einstein :

$$\boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{v} = \sum_i^n g_{ij} u^i v^i \sum_i^n u_i v^i = u_i v^i \tag{B.2}$$

Le tenseur g_{ij} est le tenseur métrique qui permet de définir le produit scalaire entre deux vecteurs.[1] Si les vecteurs $\boldsymbol{e_i}$ forment une base, les composantes du tenseur métrique sont $g_{ij} = \boldsymbol{e_i}\boldsymbol{e_j}$. L'élévation et l'abaissement d'un indice s'effectuent à l'aide du

1. Par abus et facilité de langage, nous confondons les tenseurs et les vecteurs avec leurs composantes. En toute rigueur il s'agit du tenseur g de composantes g_{ij}.

tenseur métrique suivant la relation :

$$u_i = g_{ij} u^j \tag{B.3}$$

Dans le cas d'un espace euclidien doté d'une base orthonormée $g_{ij} = g^{ij}$. Les coordonnées covariantes et contravariantes sont indifférenciées ($u_i = u^i$). Une représentation matricielle du tenseur métrique est alors :

$$(g_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{B.4}$$

Définition du produit vectoriel

Suivant la convention d'Einstein, les composantes du produit vectoriel entre $\boldsymbol{u}$ et $\boldsymbol{v}$ s'écrivent :

$$w^i = \epsilon^i{}_{jk} u^j v^k \tag{B.5}$$

Le symbole ϵijk est le symbole de Levi-Civita défini par :

$$\epsilon_{ijk} = \begin{cases} +1 & \text{si } (i,j,k) = (1,2,3), (2,3,1) \text{ ou } (3,1,2), \\ -1 & \text{si } (i,j,k) = (3,2,1), (1,3,2) \text{ ou } (2,1,3), \\ 0 & \text{si } i = j \text{ ou } j = k \text{ ou } k = i. \end{cases} \tag{B.6}$$

Par exemple :

$$w^3 = \epsilon^3{}_{jk} u^j v^k = \epsilon^3{}_{12} u^1 v^2 + \epsilon^3{}_{21} u^2 v^1 = u^1 v^2 - u^2 v^1 \tag{B.7}$$

B.1.2 | Cas relativiste

Dans le cas relativiste, les objets évoluent dans l'espace de Minkowski à quatre dimensions (trois dimensions spatiales et une dimension temporelle) dit « pseudo-euclidien ». Afin de différentier le cas relativiste du cas galiléen, les composantes des vecteurs sont repérées pas des lettres grecques (μ, ν) qui varient de 0 à 3 ou de 1 à 4, selon les notations employées par les auteurs. Dans le premier cas, la composante temporelle (imaginaire) est indiquée par l'indice 0, dans le second cas, elle l'est par l'indice 4. Un 4-vecteur $\boldsymbol{A}$ est ainsi défini par ses composantes $A^\mu = (a^0, \boldsymbol{a})$.

Dans cet espace, le tenseur métrique est :

$$(g_{\mu\nu}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{B.8}$$

Le produit scalaire entre deux 4-vecteurs a_μ et b_μ s'écrit :

$$a_\mu b^\mu = g_{\mu\nu} a^\mu b^\nu = a_0 b^0 - \boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b} \tag{B.9}$$

La métrique $g_{\mu\nu}$ porte la signature $(+, -, -, -)$. Une autre signature également rencontrée dans la littérature est $(-, +, +, +)$. Dans ce cas, le produit scalaire précédent est :

$$a_\mu b^\mu = g_{\mu\nu} a^\mu b^\nu = -a_0 b^0 + \boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b} \tag{B.10}$$

La quantité $a_\mu b^\mu$ est appelée un invariant relativiste puisqu'elle est indépendante du choix du référentiel (invariante par transformation de Lorentz) comme l'est le produit scalaire dans l'espace galiléen.

Le passage des coordonnées covariante à contravariante s'effectue à l'aide de la métrique :

$$A_\mu = g_{\mu\nu} A^\nu \tag{B.11}$$

Concrètement, $a^0 = a_0$ et $a^i = -a_i$ et donc $A_\mu = (a_0 - \boldsymbol{a})$

B.2 Opérateurs de l'algèbre linéaire

Les équations présentes dans cette thèse font pour la plupart appel à l'algèbre linéaire. Voici quelques rappels quant aux différents opérateurs et leurs notations.

B.2.1 Cas galiléen

L'opérateur différentiel est noté $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}$ pour les fonctions à une seule variable et $\frac{\partial}{\partial x^i}$ pour les fonctions à plusieurs variables où i est l'indice de la composante par rapport à laquelle la fonction est dérivée. Une notation abrégée équivalente est simplement ∂_i.

À partir de l'opérateur différentiel, il est possible de définir un opérateur vectoriel nabla :

$$\boldsymbol{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x^1}, \frac{\partial}{\partial x^2}, \frac{\partial}{\partial x^3} \right) \tag{B.12}$$

Cet opérateur permet de construire tous les autres opérateurs de l'algèbre linéaire.

Le gradient d'une fonction f est le champ de vecteurs :

$$\boldsymbol{\nabla} f = \partial_1 f \boldsymbol{e_1} + \partial_2 f \boldsymbol{e_2} + \partial_3 f \boldsymbol{e_3} \tag{B.13}$$

La divergence d'un champ de vecteurs $\boldsymbol{u}$ est le scalaire :

$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{u} = \partial_1 u^1 + \partial_2 u^2 + \partial_3 u^3 \tag{B.14}$$

Le rotationnel d'un champ de vecteurs $\boldsymbol{u}$ est une fonction vectorielle :

$$\boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{u} = \epsilon^i{}_{jk} \partial^j u^k \boldsymbol{e_i} \tag{B.15}$$

Le laplacien d'une fonction ou d'un champ de vecteurs :

$$\nabla^2 = \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{\nabla} \tag{B.16}$$

B.2.2 | Cas relativiste

Les opérateurs définis précédemment possèdent leurs équivalents dans l'espace de Minkowski.

L'opérateur 4-nabla :

$$\partial_\mu = \frac{\partial}{\partial x^\mu} \tag{B.17}$$

Le 4-gradient d'une fonction f :

$$\partial_\mu f = \left(\frac{1}{c} \partial_t f, \boldsymbol{\nabla} f \right) \tag{B.18}$$

La 4-divergence d'un 4-vecteur A^μ :

$$\partial_\mu A^\mu = \frac{1}{c} \partial_t a^0 + \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{a} \tag{B.19}$$

Le d'alembertien :

$$\Box = \partial_\mu \partial^\mu = \frac{1}{c^2} \partial_t^2 - \nabla^2 \tag{B.20}$$

Annexe C

Démonstrations

C.1 Démonstration de Vigier de la règle de Born

Cette démonstration correspond à celle présentée dans la thèse de Vigier à partir du postulat des fluctuations du champ quantique. Conformément à la théorie de la double solution, deux onde sont présentes. La première est l'onde physique $\varphi(\boldsymbol{x}, t)$ et la deuxième est l'onde probabiliste $\Psi(\boldsymbol{x}, t)$. L'équation de continuité en représentation hydrodynamique s'écrit pour l'onde physique :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0 \tag{C.1}$$

où $\rho = |\varphi|^2$ et $\boldsymbol{v}$ correspondent à la densité et à la vitesse réelle du fluide en chaque point.

En représentation probabiliste, l'équation de continuité s'écrit avec $P = |\Psi|^2$:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (P \boldsymbol{v}) = 0 \tag{C.2}$$

En introduisant le rapport $F(\boldsymbol{x}, t) = P(\boldsymbol{x}, t)/\rho(\boldsymbol{x}, t)$, la démonstration de Vigier consiste à prouver qu'au bout d'un temps relativement bref ce rapport est constant, c'est à dire que les deux densités, probabiliste et réelle, son égales.

Soit des fluctuations du fluide pilote, de durée Δt très courte, réparties aléatoirement dans le temps selon la densité $\nu(t)$ indépendante du mouvement du fluide (processus de Poisson). Au cours d'une fluctuation à un instant t, chaque particule est transportée d'une position $\boldsymbol{x}$ à une position aléatoire $\boldsymbol{x}'$. La probabilité pour qu'un élément passe du point $\boldsymbol{x}$ au point $\boldsymbol{x}'$ de l'intervalle $\mathrm{d}\boldsymbol{x}'$ au cours de l'intervalle de temps δt, petit mais long par rapport à Δt est :

$$\nu(t) \delta t K(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}', t) \tag{C.3}$$

avec la relation :

$$\int_v K(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x'}, t)\mathrm{d}\boldsymbol{x'} = 1 \tag{C.4}$$

Cette dernière traduit le fait que le fluide parti du point x arrive nécessairement quelque part.

Par hypothèse de Vigier, la densité du fluide en chaque point reste inchangée lorsque les fluctuations se sont produites. Cette conservation s'exprime par l'égalité :

$$\rho(\boldsymbol{x}, t) = \int_v K(\boldsymbol{x'}, \boldsymbol{x}, t).\rho(\boldsymbol{x'}, t).\mathrm{d}\boldsymbol{x'} \tag{C.5}$$

Physiquement, cette hypothèse signifie que la densité du fluide possède une valeur privilégiée ρ parmi toues les densités possibles.

Le nombre de particules dans un élément de volume $\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t)$ est :

$$\Delta N = P(\boldsymbol{x}, t).\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t) \tag{C.6}$$

Ce nombre varie seulement en présence de fluctuations. Cette variation au cours du temps δt est notée :

$$\delta\Delta N = \delta P(\boldsymbol{x}, t).\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t) \tag{C.7}$$

Cette variation est égale au nombre de particules dont les sauts aboutissent dans $\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t)$ moins le nombre de particules dont les sauts partent de $\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t)$.

Les particules dont les sauts aboutissent dans $\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t)$ se divisent en deux catégories :

- a) Les particules qui proviennent de l'extérieur de $\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t)$
- b) Les particules qui proviennent de l'intérieur de $\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t)$

Les particules dont les sauts partent de $\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t)$ se divisent elles aussi en deux catégories :

- c) Les particules qui sortent de $\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t)$
- d) Les particules qui restent dans $\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t)$

Les particules des catégories b) et d) sont égales (ce sont les particules qui sont à l'état initial dans $\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t)$ et qui y restent après leur saut). La variation $\delta\Delta N$ du nombre de particules est donc le nombre de particules de a) moins le nombre de particules de c), ce qui revient à dire que la variation du nombre de particules correspond au nombre de particules qui entrent dans $\Delta\omega(\boldsymbol{x}, t)$ moins le nombre de particules qui en sortent.

Le nombre de particules de a) et b) s'écrit :

$$\nu(t)\delta t \int \Delta\omega(\boldsymbol{x}, t).P(\boldsymbol{x'}, t).K(\boldsymbol{x'}, \boldsymbol{x}, t).\mathrm{d}\boldsymbol{x'}$$

Le nombre de particules de c) et d) s'écrit :

$$\nu(t)\delta t \int \Delta\omega(\boldsymbol{x},t).P(\boldsymbol{x},t).K(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x'},t).\mathrm{d}\boldsymbol{x'} = \nu(t)\delta t.\Delta\omega(\boldsymbol{x},t).P(\boldsymbol{x},t)$$

D'où :

$$\delta\Delta N = \nu(t)\delta t\Delta\omega(\boldsymbol{x},t)\left[\int P(\boldsymbol{x'},t).K(\boldsymbol{x'},\boldsymbol{x},t).\mathrm{d}\boldsymbol{x'} - P(\boldsymbol{x},t)\right]$$

qui peut se réécrire en remarquant que $= \delta P(\boldsymbol{x},t) = \delta\Delta N/\Delta\omega(\boldsymbol{x},t)$:

$$\frac{\delta P(\boldsymbol{x},t)}{\delta t} = \nu(t)\left[\int P(\boldsymbol{x'},t).K(\boldsymbol{x'},\boldsymbol{x},t).\mathrm{d}\boldsymbol{x'} - P(\boldsymbol{x},t)\right]$$

Cette équation définit la variation du nombre de particules dans $\Delta\omega(\boldsymbol{x},t)$ due aux fluctuations. En introduisant $P(\boldsymbol{x},t) = F(\boldsymbol{x},t).\rho(\boldsymbol{x},t)$, il vient :

$$\delta\Delta N = \delta P(\boldsymbol{x},t).\Delta\omega(\boldsymbol{x},t) = \delta F(\boldsymbol{x},t).\rho(\boldsymbol{x},t).\Delta\omega(\boldsymbol{x},t) \tag{C.8}$$

En égalisant les deux valeurs de $\delta\Delta N$ on obtient la relation :

$$\begin{array}{rcl} \frac{\delta F(\boldsymbol{x},t)}{\delta t} & = & \nu(t)\left[\int F(\boldsymbol{x'},t).\frac{\rho(\boldsymbol{x'},t)}{\rho(\boldsymbol{x},t)}K(\boldsymbol{x'},\boldsymbol{x},t).\mathrm{d}\boldsymbol{x'} - F(\boldsymbol{x},t)\right] \\ & = & \nu(t)\left[\int F(\boldsymbol{x'},t).L(\boldsymbol{x'},\boldsymbol{x},t).\mathrm{d}\boldsymbol{x'} - F(\boldsymbol{x},t)\right] \end{array} \tag{C.9}$$

En posant $L(\boldsymbol{x'},\boldsymbol{x},t) = K(\boldsymbol{x'},\boldsymbol{x},t).\frac{\rho(\boldsymbol{x'},t)}{\rho(\boldsymbol{x},t)}$ lorsque $\rho(\boldsymbol{x},t)$ est différent de 0. La relation (C.5) implique que :

$$\int L(\boldsymbol{x'},\boldsymbol{x},t)\mathrm{d}\boldsymbol{x'} = 1 \tag{C.10}$$

En changeant l'horloge, c'est à dire en posant $\delta\tau = \nu(t)\delta t$ (ce qui suppose que $\nu(t) \gg \epsilon > 0$) :

$$\frac{\delta F(\boldsymbol{x},\tau)}{\delta\tau} = \int F(\boldsymbol{x'},\tau).L(\boldsymbol{x'},\boldsymbol{x},\tau).\mathrm{d}\boldsymbol{x'} - F(\boldsymbol{x},\tau) \tag{C.11}$$

En raison de l'équation (C.10), une solution de cette équation est $F = Cste$.

Soit $\boldsymbol{x_M}(\tau)$ et $\boldsymbol{x_m}(\tau)$ les valeurs de $\boldsymbol{x}$ pour lesquelles $F(\boldsymbol{x},\tau)$ atteint ses valeurs maximum $M(\tau)$ et minimum $m(\tau)$ à l'instant τ. De (14.2) et (14.3) on en déduit les inégalités :

$$\left\{\begin{array}{rcrcl} \frac{dM(\tau)}{d\tau} & + & M(\tau) & \leq & M(\tau) \\ \frac{dm(\tau)}{d\tau} & + & m(\tau) & \geq & m(\tau) \end{array}\right. \tag{C.12}$$

Si $M(\tau)$ et $m(\tau)$ sont des extrema absolus de F dans les domaines $D(\boldsymbol{x_M})$ et $D(\boldsymbol{x_m})$ compacts. Les fonctions $M(\tau)$ et $m(\tau)$ sont des fonctions monotones respectivement non croissante et non décroissante au cours du temps. Posons $\lambda(\tau) = M(\tau) - m(\tau)$

la condition $\frac{d\lambda}{d\tau} \leq 0$ fait que la fonction $\lambda(\tau)$ est monotone et non croissante d'où $\lim_{\tau\to\infty} \frac{d\lambda(\tau)}{d\tau} = 0$. De (C.11) il est possible de déduire l'égalité :

$$\frac{d\lambda(\tau)}{d\tau} = -\lambda(\tau) + \int_v \left[L(\boldsymbol{x}', \boldsymbol{x_M}, \tau) - L(\boldsymbol{x}', \boldsymbol{x_m}, \tau)\right] F(\boldsymbol{x}', \tau).\mathrm{d}\boldsymbol{x}' \tag{C.13}$$

Qui peut se réécrire en ajoutant un terme nul :

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda(\tau)}{d\tau} &= -\lambda(\tau) + \int_v L(\boldsymbol{x}', \boldsymbol{x_M}, \tau)(F(\boldsymbol{x}', \tau) - m(\tau)).\mathrm{d}\boldsymbol{x}' \\ &\quad - \int_v L(\boldsymbol{x}', \boldsymbol{x_m}, \tau)(F(\boldsymbol{x}', \tau) - m(\tau)).\mathrm{d}\boldsymbol{x}' \end{aligned} \tag{C.14}$$

Qui peut encore s'écrire sous la forme :

$$\frac{1}{\lambda(\tau)}\frac{d\lambda(\tau)}{d\tau} = -1 + \int_v \left\{L(\boldsymbol{x}', \boldsymbol{x_M}, \tau) - L(\boldsymbol{x}', \boldsymbol{x_m}, \tau)\right\}.\frac{F(\boldsymbol{x}', \tau) - m(\tau)}{\lambda(\tau)}.\mathrm{d}\boldsymbol{x}' \tag{C.15}$$

Il faut distinguer deux cas :

1. $\lim_{\tau\to\infty} \lambda(\tau) = 0$. Dans ce cas $F \to Cste$ partout et est égale à la valeur commune prise par M et m.

2. $\lim_{\tau\to\infty} \lambda(\tau) = \lambda_l \neq 0$. L'égalité (C.15) donne à la limite en posant

$$\begin{cases} M(\infty) &= M_l &= Cste \\ m(\infty) &= m_l &= Cste \end{cases}$$

Il vient alors :

$$\begin{aligned} &\int_v L(\boldsymbol{x}', \boldsymbol{x_M}, \infty) \left\{\frac{F(\boldsymbol{x}', \infty) - m_l}{\lambda_l}\right\} \mathrm{d}\boldsymbol{x}' \\ &= 1 + \int L(\boldsymbol{x}', \boldsymbol{x_m}, \infty). \left\{\frac{F(\boldsymbol{x}', \infty) - m_l}{\lambda_l}\right\} \mathrm{d}\boldsymbol{x}' \end{aligned}$$

Qui est, en raison de (C.10), possible si :

$$\begin{cases} F(\boldsymbol{x}', \infty) = M_l \text{ partout sur} D(\boldsymbol{x_M}) \text{ lorsque } \tau \to \infty \\ F(\boldsymbol{x}', \infty) = m_l \text{ partout sur} D(\boldsymbol{x_{Mm}}) \text{ lorsque } \tau \to \infty \end{cases} \tag{C.16}$$

et si $\frac{F(\boldsymbol{x}', \tau) - m(\tau)}{\lambda(\tau)} \leq 1$ quelque soit τ).

Les relations (C.16) sont compatibles uniquement si M_l et m_l sont égaux.

Si le temps de relaxation $\tau \geq \epsilon > 0$ pendant le temps nécessaire pour que la distribution limite s'établisse, la fonction $F(\boldsymbol{x}, t)$ tend toujours vers 1 et il résulte alors que

$$\lim_{t\to\infty} P(\boldsymbol{x}, \tau) = \rho(\boldsymbol{x}, \tau) \tag{C.17}$$

Ce qui démontre le résultat attendu : une distribution initiale quelconque de particules selon les hypothèses de l'ICMQ tend nécessairement vers $\rho = P$ au cours du temps.

C.2 Paramètres de Cayley-Klein

Cette annexe est relative à la description hydrodynamique de l'équation de Pauli par Bohm, Schiller et Tiomno de la section 6.1. Elle précise les expressions algébriques des paramètres Cayley-Klein b_i en fonction des angles d'Euler.

D'après l'équation 6.7, les b_i sont reliés aux angles d'Euler par les relations :

$$b_1 = \cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{\psi+\varphi}{2} \qquad b_2 = \cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\psi+\varphi}{2} \tag{C.18}$$

$$b_3 = -\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\psi+\varphi}{2} \qquad b_4 = \sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\psi-\varphi}{2} \tag{C.19}$$

Le quadruplet (b_1, b_2, b_3, b_4) est multivalué, c'est à dire qu'à chaque valeur des angles d'Euler correspond deux valeurs de b_i (positive et négative).

Bohm, Tiomno et Schiller vont alors abaisser à deux le nombre de degrés de liberté.

Un premier degré de liberté peut être supprimé à partir de l'égalité sur les coefficients qui doit vérifier $b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2 = 1$.

Ensuite, les crochets de Poisson classiques entre les composantes du spineur

$$\{\Psi_a^\star(\boldsymbol{x}'), \Psi_b(\boldsymbol{x})\} = \frac{\delta_{ab}}{i\hbar}\delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}') \tag{C.20}$$

obtenues par dérivation de l'équation de Pauli à partir de son hamiltonien

$$H = \int \left[\frac{\hbar^2}{2m}\left|(\nabla - ie\frac{\boldsymbol{A}}{c})^2\Psi\right|^2 + \phi|\Psi|^2 + \frac{e\hbar}{2mc}\Psi^\dagger(\boldsymbol{\sigma}\cdot\boldsymbol{B})\Psi\right]\mathrm{d}\boldsymbol{x} \tag{C.21}$$

imposent également les relations :

$$\{b_1, b_2\} = \{b_3, b_4\} = 1 \quad \text{et} \quad \{b_1, b_3\} = \{b_2, b_4\} = \{b_2, b_3\} = \{b_2, b_4\} = 0 \tag{C.22}$$

Elles signifient que b_1 et b_2 ainsi que b_3 et b_4 sont des variables conjuguées. Le spineur β ne contient en réalité que deux variables indépendantes. D'après la définition du vecteur de spin $\boldsymbol{S}$ en 6.5, le crochet de Poisson impose également une relation cyclique entre chacune de ses trois composantes :

$$\{S_x, S_y\} = S_z \tag{C.23}$$

La relation inverse de passage des paramètres de Cayley-Klein aux angles d'Euler est donnée par les relations trigonométriques :

$$\psi = \tan^{-1}\frac{b_2}{b_1} + \tan^{-1}\frac{b_4}{b_3} \quad \varphi = \tan^{-1}\frac{b_2}{b_1} - \tan^{-1}\frac{b_4}{b_3} \tag{C.24}$$

C.3 Expression des projections S et S' et des opérateurs quantiques J et J'

Cette annexe se rapporte à la quantification des moments cinétiques du rotateur relativiste.

Les relations entre le moment angulaire et la projection du moment ${S_k}'^{\pm}$ sont données par :

$$\begin{cases} p_{\varphi^\pm} = {S_3}'^{\pm} \\ p_{\theta^\pm} = {S_1}'^{\pm}\sin\varphi^\pm + {S_2}'^{\pm}\cos\varphi^\pm \\ p_{\psi^\pm} = -{S_1}'^{\pm}\sin\theta^\pm\cos\varphi^\pm + {S_2}'\sin\theta^\pm\sin\varphi^\pm + {S_3}'\cos\theta^\pm \end{cases} \tag{C.25}$$

Les projections des ${S_k}^{\pm}$ moments sur le repère $A^\pm$ est :

$$\begin{cases} {S_1}^{\pm} = -p_{\theta^\pm}\sin\psi^\pm - p_{\psi^\pm}\cot\theta^\pm\cos\psi^\pm + p_{\varphi^\pm}\frac{\cos\psi^\pm}{\sin\theta^\pm} \\ {S_2}^{\pm} = p_{\theta^\pm}\cos\psi^\pm - p_{\psi^\pm}\cot\theta^\pm\sin\psi^\pm + p_{\varphi^\pm}\frac{\sin\psi^\pm}{\sin\theta^\pm} \\ {S_3}^{\pm} = p_{\psi^\pm} \end{cases} \tag{C.26}$$

Et pour celles des ${S_k}'^{\pm}$ sur le repère $B^\pm$:

$$\begin{cases} {S_1}'^{\pm} = p_{\theta^\pm}\sin\varphi^\pm + p_{\varphi^\pm}\cot\theta^\pm\cos\varphi^\pm - p_{\psi^\pm}\frac{\cos\varphi^\pm}{\sin\theta^\pm} \\ {S_2}'^{\pm} = p_{\theta^\pm}\cos\varphi^\pm - p_{\varphi^\pm}\cot\theta^\pm\sin\varphi^\pm + p_{\psi^\pm}\frac{\sin\varphi^\pm}{\sin\theta^\pm} \\ {S_3}'^{\pm} = p_{\varphi^\pm} \end{cases} \tag{C.27}$$

La quantification de ces projections est réalisée en substituant les moments conjugués par des opérateurs quantiques :

$$\begin{cases} p_{\varphi^\pm} \to -i\hbar\frac{\partial}{\partial\varphi^\pm} \\ p_{\theta^\pm} \to -i\hbar\frac{\partial}{\partial\theta^\pm} \\ p_{\psi^\pm} \to -i\hbar\frac{\partial}{\partial\psi^\pm} \end{cases} \tag{C.28}$$

La quantification remplace alors les S_k par des opérateurs J_k sur $A^\pm$:

$$\begin{cases} {J_1}^{\pm} = -i\hbar\left(-\sin\psi^{\pm}\frac{\partial}{\partial\theta^{\pm}} - \cot\theta^{\pm}\cos\psi^{\pm}\frac{\partial}{\partial\psi^{\pm}} + \frac{\cos\psi^{\pm}}{\sin\theta^{\pm}}\frac{\partial}{\partial\varphi^{\pm}}\right) \\ {J_2}^{\pm} = -i\hbar\left(\cos\psi^{\pm}\frac{\partial}{\partial\theta^{\pm}} - \cot\theta^{\pm}\sin\psi^{\pm}\frac{\partial}{\partial\psi^{\pm}} + \frac{\sin\psi^{\pm}}{\sin\theta^{\pm}}\frac{\partial}{\partial\varphi^{\pm}}\right) \\ {J_3}^{\pm} = -i\hbar\frac{\partial}{\partial\psi^{\pm}} \end{cases} \tag{C.29}$$

Et par des opérateurs ${J_k}'$ sur $B^{\pm}$:

$$\begin{cases} {J_1}'^{\pm} = -i\hbar\left(\sin\varphi^{\pm}\frac{\partial}{\partial\theta^{\pm}} + \cot\theta^{\pm}\cos\varphi^{\pm}\frac{\partial}{\partial\varphi^{\pm}} - \frac{\cos\varphi^{\pm}}{\sin\theta^{\pm}}\frac{\partial}{\partial\psi^{\pm}}\right) \\ {J_2}'^{\pm} = -i\hbar\left(\cos\varphi^{\pm}\frac{\partial}{\partial\theta^{\pm}} - \cot\theta^{\pm}\sin\varphi^{\pm}\frac{\partial}{\partial\varphi^{\pm}} + \frac{\sin\varphi^{\pm}}{\sin\theta^{\pm}}\frac{\partial}{\partial\psi^{\pm}}\right) \\ {J_3}'^{\pm} = -i\hbar\frac{\partial}{\partial\varphi^{\pm}} \end{cases} \tag{C.30}$$

Références bibliographiques

Sources primaires

Correspondance

Bohm, David. David Bohm à Évry Schatzman, 7 septembre 1952. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. David Bohm à Évry Schatzman, 16 juin 1952. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. David Bohm à Évry Schatzman, 12 octobre 1953. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. David Bohm à Évry Schatzman, 22 décembre 1953. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. David Bohm à Évry Schatzman, 9 octobre 1953. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. David Bohm à Évry Schatzman, [Janvier 1952 ?]. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. David Bohm à Évry Schatzman, [Fin septembre 1951 ?]. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. David Bohm à Miriam Yevick, 5 janvier 1952. The David Bohm Papers. Section C - Correspondence - Yevick, M.L. - C.116-C.126. Birkbeck Library, University of London, Londres.

———. David Bohm à Miriam Yevick, 24 octobre 1953. The David Bohm Papers. Section C - Correspondence - Yevick, M.L. - C.116-C.126. Birkbeck Library, University of London, Londres.

———. David Bohm à Wolfgang Pauli. In Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. Band IV, Teil I : 1950–1952*, 389-393.

Born, Max. Max Born à Jack F. Brimble, 14 mars 1951. Max Born Papers - 1/3/2/21. Churchill Archives Centre, Churchill College, Cambridge, UK.

Destouches, Jean-Louis. Jean-Louis Destouches à Léon Rosenfeld, 19 décembre 1951. Léon Rosenfeld's papers. Niels Bohr Archives, University of Copenhagen, Copenhague.

Fock, Vladimir A. Vladimir Fock à Jean-Pierre Vigier, 8 septembre 1959. V. A. Fock Papers - 1034-3-827. Archives de l'Académie des Sciences de Russie, Saint-Pétersbourg.

Joliot-Curie, Frédéric. Frédéric Joliot-Curie à Jean-Pierre Vigier, 14 mars 1955. Fonds Frédéric et Irène Joliot-Curie - F165. Archives du Musée Curie, Bibliothèque Nationale de France, Paris.

———. Frédéric Joliot-Curie à Léon Rosenfeld, 21 avril 1952. Léon Rosenfeld's papers. Niels Bohr Archives, University of Copenhagen, Copenhague.

———. Madame la secrétaire de Frédéric Joliot-Curie à Jean-Pierre Vigier, 7 janvier 1955. Fonds Frédéric et Irène Joliot-Curie - F165. Archives du Musée Curie, Bibliothèque Nationale de France, Paris.

Marx, Karl. Karl Marx à Ludwig Kugelmann. In *Correspondance : Juillet 1870 – Décembre 1871*, par Karl Marx et Friedrich Engels, sous la direction de Gilbert Badia, traduit par Jean Mortier, Claude Mainfroy et Jean Wetzler, t. XI. Paris : Éditions sociales, 12 avril 1971.

Pauli, Wolfgang. Wolfgang Pauli à Markus Fierz. In *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. Band IV, Teil I : 1950–1952*, 499-502.

Rosenfeld, Léon. Léon Rosenfeld à David Bohm, 30 mai 1952. The David Bohm Papers. Section C - Correspondence - Rosenfeld L. - C.58. Birkbeck Library, University of London, Londres.

———. Léon Rosenfeld à Évry Schatzman, 6 avril 1952. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/95). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. Léon Rosenfeld à Frédéric Joliot-Curie, 6 avril 1952. Léon Rosenfeld's papers. Niels Bohr Archives, University of Copenhagen, Copenhague.

Schatzman, Évry. Évry Schatzman à David Bohm, 3 décembre 1951. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. Évry Schatzman à David Bohm, 21 septembre 1952. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. Évry Schatzman à David Bohm, 15 mai 1952. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. Évry Schatzman à David Bohm, 20 février 1952. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. Évry Schatzman à Georges Cogniot. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/203). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. Évry Schatzman à Léon Rosenfeld, 17 juin 1950. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/95). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. Évry Schatzman à Léon Rosenfeld, 30 mars 1952. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/95). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

———. Évry Schatzman à Léon Rosenfeld, 28 avril 1952. Léon Rosenfeld's papers. Niels Bohr Archives, University of Copenhagen, Copenhague.

———. Évry Schatzman à Pál Gombás, 28 juillet 1952. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/85). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

Vassails, Gérard. Gérard Vassails à Évry Schatzman, 1952. Fonds Évry Schatzman (Ms 1086/98). Archives de la Bibliothèque de l'Observatoire, Paris.

Viger, Jean-Pierre. Jean-Pierre Vigier à Vladimir Fock, 30 juin 1955. V. A. Fock Papers - 1034-3-827. Archives de l'Académie des Sciences de Russie, Saint-Pétersbourg.

Vigier, Jean-Pierre. Jean-Pierre Vigier à David Bohm, 17 mai 1962. The David Bohm Papers. Section C - Correspondence - Vigier J.-P. - C.61. Birkbeck Library, University of London, Londres.

———. Jean-Pierre Vigier à David Bohm, 1962. The David Bohm Papers. Section C - Correspondence - Vigier J.-P. - C.61. Birkbeck Library, University of London, Londres.

Documents d'archives

Archives de la section de montée des cadres. Élections des organismes fédéraux de Paris 1952–1966. Archives du Parti Communiste Français – 261J21/88. Archives départementales de la Seine-Saint-Denis, Bobigny.

Archives du PCF. La Lutte idéologique en liaison avec la lutte politique de masse, 19 mars 1955. Fonds Francis Cohen – La Nouvelle Critique, 1954–1994 – 354J68 : Activité/fonctionnement, 1954–1979. Archives départementales de la Seine-Saint-Denis, Bobigny.

Archives du PCF. Note sur la diffusion de « la Nouvelle Critique», 1955. Fonds Francis Cohen – La Nouvelle Critique, 1954–1994 – 354J68 : Activité/fonctionnement, 1954–1979. Archives départementales de la Seine-Saint-Denis, Bobigny.

CNRS. 19780309/27 - CNRS 2398 - Liste des rapports du C.E.A 1948–1953. Archives nationales de France, Pierrefitte-sur-Seine.

État Français - Gouvernement de Vichy. Arrestation de Jean-Pierre Vigier, Rapports de police, avril 1942. Archives du Ministère de l'intérieur – 2015/3 MI 1 dossier n° 419.827 : Jean-Pierre Vigier (1942-1968). Archives nationales de France, Paris.

Leduc, Victor. Note au Secrétariat sur la réunion des intellectuels communistes du Ve du samedi 19 mars 1955, 31 mars 1955. Fonds Victor Leduc (F delta res 761/2 : Victor Leduc et le PCF). Bibliothèque de documentation internationale contemporaine, Nanterre.

Records of the Security Service - Soviet intelligence agents and suspected agents. KV2/1614 : ALEXANDER FOOTE (1942–1951). UK National Archives. http://discovery.nationalarchives.gov.uk/details/r/C11190814.

———. KV2/1622 : Jean-Pierre Vigier/Tamara Vigier (1942–1951). UK National Archives. http://discovery.nationalarchives.gov.uk/details/r/C11190822.

Union des étudiants communistes (tendance de gauche). Communiqué, 28 février 1964. Fonds Victor Leduc (F delta res 761/2 : Victor Leduc et le PCF). Bibliothèque de documentation internationale contemporaine, Nanterre.

Publications

Aharonov, Yakir, et Leonard Susskind. «Observability of the Sign Change of Spinors under 2π Rotations». *Physical Review* 158 (5 1967) : 1237-1238.

Andrade E Silva, João. «La théorie des systèmes de particules dans l'interprétation causale de la Mécanique ondulatoire». Thèse de doct., Faculté des Sciences de Paris, 1960.

———. «La théorie des systèmes de particules dans l'interprétation causale de la Mécanique ondulatoire». *Annales de l'Institut Henri Poincaré* 16, nº 4 (1960) : 289-359.

Aubel, Eugène. «Discours d'ouverture». *La Pensée* 57 (1954) : 37-38.

Barbieri, G., Serge Depaquit et Jean-Pierre Vigier. «Spectroscopy of Baryons and Resonances Considered as Quantized Levels of a Relativistic Rotator». *Nuovo Cimento* XXX, nº 1 (1963).

Bell, John S. «On the Einstein Podolsky Rosen Paradox». *Physics* 1 (1964) : 195-200.

———. «On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics». *Reviews of Modern Physics* 38, nº 3 (1966) : 447-452.

———. *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Collected Papers on Quantum Philosophy. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1987.

Bernal, John Desmond. *The Social Function of Science*. Londres : G. Routledge & Sons Limited, 1939. Londres : Faber & Faber, 2010.

Bernstein, J., Herbert. «Spin precession during interferometry of fermions and the phase factor associated with rotations through 2π radians». *Physical Review Letters* 18, nº 24 (1967) : 1102-1103.

Blokhinzev, Dimitri I. «Critique de la conception idéaliste de la théorie quantique». In La Nouvelle Critique, *Questions scientifiques (Physique)*, 95-129.

———. «Du développement de la physique actuelle». *La Nouvelle Critique* 113 (1960) : 64-70.

Bohm, David. «A proposed explanation of quantum theory in terms of hidden variables at a sub-quantum-mechanical level». In Körner, *Observation and Interpretation, a Symposium of Philosophers and Physicists*, 33-40.

———. «A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 1». *Physical Review* 85, nº 2 (1952) : 166-179.

———. «A suggested interpretation of Quantum Theory in terms of Hidden Variables, Part 2». *Physical Review* 85, nº 2 (1952) : 180-193.

———. *Causality and Chance in Modern Physics*. Londres : Routledge & Kegan Paul Ltd, 1957.

———. «Comments on an Article of Takabayasi concerning the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures». *Progress of Theoretical Physics* 9, nº 3 (1953) : 273.

———. «Proof That Probability Density Approaches $|\Psi|^2$ in Causal Interpretation of the Quantum Theory». *Physical Review* 89, nº 2 (1953) : 458-466.

———. *Quantum Theory*. New York, NY : Prentice-Hall, 1951.

Bohm, David, et Pines David. «A Collective Description of Electron Interactions : II. Collective vs Individual Particle Aspects of the Interactions». *Physical Review* 85 (1952) : 338-353.

———. «A Collective Description of Electron Interactions : III. Coulomb Interactions in a Degenerate Electron Gas». *Physical Review* 92 (1953) : 609-625.

———. «A Collective Description of Electron Interactions. I. Magnetic Interactions». *Physical Review* 82 (1951) : 625-634.

Bohm, David, Moshé Flato, Francis Halbwachs, Pierre Hillion et Jean-Pierre Vigier. «On the "Space-Time Character" of Internal Symmetries of Elementary Particles». *Nuovo Cimento* XXXVI, nº 61 (1965) : 672-675.

Bohm, David, et Eugene P. Gross. «Theory of plasma oscillations. A. Origin of medium-like behavior». *Physical Review* 75, nº 12 (1949) : 1851-1864.

Bohm, David, Francis Halbwachs, Georges Lochak et Jean-Pierre Vigier. «Exposé n°15 du 20 mars 1956 : Interprétation de l'équation de Dirac comme approximation linéaire de l'équation d'une onde se propageant dans un fluide tourbillonnaire en agitation chaotique du type éther de Dirac (Partie 2)». *Séminaire de Théories Physiques dirigé par Mr Louis de Broglie*, 1956.

Bohm, David, et Basil J. Hiley. «On the intuitive understanding of nonlocality as implied by quantum theory». *Foundations of Physics* 5, nº 1 (1975) : 93-109.

———. *The undivided universe : An ontological interpretation of quantum theory*. New York, NY : Routledge, 1993.

Bohm, David, Pierre Hillion, Takehiko Takabayasi et Jean-Pierre Vigier. «Relativistic Rotators and Bilocal Theory». *Progress of Theoretical Physics* 23, nº 3 (1960) : 496-511.

Bohm, David, Pierre Hillion et Jean-Pierre Vigier. «Internal Quantum States of Hyperspherical (Nakano) Relativistic Rotators». *Progress of Theoretical Physics* 24, nº 4 (1960) : 761-782.

Bohm, David, Georges Lochak et Jean-Pierre Vigier. «Exposé n°8 du 10 janvier 1956 : Interprétation de l'équation de Dirac comme approximation linéaire de l'équation d'une onde se propageant dans un fluide tourbillonnaire en agitation chaotique du type éther de Dirac (Partie 1)». *Séminaire de Théories Physiques dirigé par Mr Louis de Broglie*, 1956.

Bohm, David, et Ralph Schiller. «A Causal Interpretation of the Pauli Equation (B)». *Supplemento al Nuovo Cimento*, nº 1 (1955) : 67-91.

Bohm, David, Ralph Schiller et Jayme Tiomno. «A Causal Interpretation of the Pauli Equation (A)». *Supplemento al Nuovo Cimento*, nº 1 (1955) : 48-66.

Bohm, David, et Jean-Pierre Vigier. «Model of the Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations». *Physical Review* 96, nº 1 (1954) : 208-216.

———. «Relativistic Hyrodynamics of Rotating Fluid Masses». *Physical Review* 109, nº 6 (1958) : 1882-1891.

Bohr, Niels. *Physique atomique et connaissance humaine*. Sous la direction de Catherine Chevalley. Traduit par Edmond Bauer et Rolland Omnès. Paris : Gallimard, 1991.

———. «The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory». *Nature* 128 (1928) : 580-590.

Born, Max. *Optik : Ein Lehrbuch der elektromagnetische Lichttheorie*. Berlin : Springer-Verlag, 1933.

———. «Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge». *Zeitschrift für Physik* 37, nº 12 (1926) : 863-867.

Born, Max, et Emil Wolf. *Principles of Optics*. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Londres : Pergamon Press, 1959.

Bukharin, Nikolai. *Philosophical Arabesques*. Traduit par Renfrey Clarke. 1938. New York, NY : Monthly Review Press, 2005.

«La Nouvelle Critique». *Cahiers du communisme*, avril 1948, 454-455.

Casanova, Laurent. «À propos de la science». *La Nouvelle Critique* 30 (1951) : 9-16.

Charles, Jean. «Discussions en U.R.S.S sur la physique quantique». *La Nouvelle Critique* 50 (1953) : 224-226.

Cotton, Eugène. «Documents des journées nationales d'études des intellectuels communistes (Ivry, 29-30 mars 1953) - Intervention du Cercle des physiciens». *La Nouvelle Critique* 45 (1953) : 167-173.

———. «Quelques réflexions sur le matérialisme dialectique et les sciences de la nature». *La Nouvelle Critique* 94 (1958) : 106-120.

Cotton, Eugène. «Une importante contribution à la lutte contre l'indéterminisme en physique». *La Pensée* 50 (1953) : 96-100.

Danby, Gordon, Jean-Marc Gaillard, Konstantin Goulianos, Leon M. Lederman, Nari B. Mistry, Melvin Schwartz et Jack Steinberger. «Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos». *Physical Review Letters* 9, nº 1 (1962) : 36-44.

Darmois, Georges. *Les équations de la gravitation einsteinienne*. Paris : Gauthier-Villars, 1927.

de Broglie, Louis. *An Introduction To The Study Of Wave Mechanics*. Traduit par H.T. Flint. New York, NY : Dutton, 1930.

———. «Considérations de Mécanique classique préparant la justification de la Mécanique ondulatoire dans la théorie de la double solution». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 239 (1954) : 521-524.

———. «Hasard et contingence en physique quantique». *Revue de métaphysique et de morale* LV (1945) : 241-252.

———. *Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire*. Paris : Librairie scientifique Hermann & Cie, 1930.

———. *Introduction à la nouvelle théorie des particules de M. Jean-Pierre Vigier et de ses collaborateurs*. Paris : Gauthier-Villars, 1961.

———. «Justification, du point de vue de la théorie de la double solution, de la Mécanique ondulatoire des systèmes dans l'espace de configuration». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 239 (1954) : 565-567.

———. «L'interprétation de la mécanique ondulatoire». *Journal de Physique et le Radium* 20, nº 12 (1959) : 963-979.

———. «L'interprétation de la mécanique ondulatoire». *La Pensée* 91 (1960) : 16-45.

———. «La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement». *Journal de Physique et le Radium* 8, nº 5 (1927) : 225-241.

———. «La physique quantique restera-t-elle indéterministe ?» *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, nº 4 (1952) : 289-311.

———. «La structure atomique de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 184 (1927) : 273-274.

———. «La thermodynamique "cachée" des particules». *Annales de l'Institut Henri Poincaré, section A* 1, nº 1 (1964).

———. *Nouvelles perspectives en microphysique*. Paris : Gauthier-Villars, 1956.

———. *Optique electronique et corpusculaire*. Paris : Librairie scientifique Hermann & Cie, 1950.

———. «Recherches sur la théorie des quanta». Thèse de doct., Faculté des Sciences de Paris, 1924.

———. «Remarques sur la théorie de l'onde pilote». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 233 (1951) : 641-644.

———. «Souvenirs personnels sur les débuts de la mécanique ondulatoire». *Revue de la Métaphysique et de la Morale* 48, nº 1 (1941) : 1-23.

———. «Sur l'interprétation de la mécanique ondulatoire des systèmes de corpuscules dans l'espace de configuration par la théorie de la double solution». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 235 (1952) : 1345-1349.

———. «Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférences et de diffraction à la théorie des quanta de lumière». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 183 (1926) : 447-448.

de Broglie, Louis, David Bohm, Pierre Hillion, Francis Halbwachs, Takehiko Takabayasi et Jean-Pierre Vigier. «Rotator Model of Elementary Particles Considered as Relativistic Extended Structures in Minkowski Space». *Physical Review* 129, nº 1 (1963) : 438-450.

de Broglie, Louis, Francis Halbwachs, Pierre Hillion, Takehiko Takabayasi et Jean-Pierre Vigier. «Space-Time Model of Relativistic Extended Particles in Minkowski Space. II. Free Particle and Interaction Theory». *Physical Review* 129, nº 1 (1963) : 451-466.

de Broglie, Louis, et Jean-Pierre Vigier. «Application de la théorie de la fusion au nouveau modèle étendu de particules élémentaires». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 256 (1963) : 3390-3394.

Demkov, Yuriy N. «Sur les tentatives de reconsidérer l'interprétation statistique de la mécanique quantique». *La Nouvelle Critique* 93 (1957) : 107-123.

Desanti, Jean-Toussaint. *L'Humanité*, 21 décembre 1954.

Dewdney, Christopher. «Calculations in the Causal Interpretation of Quantum Mechanics». In *Quantum Uncertainties : Recent and Future Experiments and Interpretations*, sous la direction de William M. Honig, David W. Kraft et Panarella Emilio, 19-40. Plenum Press, 1987.

Dewdney, Christopher, et Kyprianidis Antonios Holland Peter R. «What happens in a spin measurement ?» *Physics Letters A* 119, nº 6 (1986) : 259-267.

Dirac, Paul A. M. «A New Classical Theory of Electrons». *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 209, nº 1098 (1951) : 291-296.

———. «Is there an Æther ?» *Nature*, nº 168 (1951) : 906-907.

———. «The Fundamental Equations of Quantum Mechanics». *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 109, nº 752 (1925) : 642-653.

———. *The Principles of Quantum Mechanics*. 1930. 4e édition. Oxford : Oxford University Press, 1958.

———. «The Quantum Theory of the Electron». *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 117, nº 778 (1928) : 610-624.

Dürr, Detlef, Sheldon Goldstein et Nino Zanghì. «Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty». *Journal of Statistical Physics* 67 (1992) : 843-907.

Einstein, Albert. «Remarques préliminaires sur les concepts fondamentaux». In George, *Louis de Broglie. Physicien et penseur*, 5-15.

Einstein, Albert, et Jacob Grommer. «Allgemeine Relativitätstheorie und Bewegungsgesetz». *Verlag der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1927, 2-13.

Einstein, Albert, Boris Podolsky et Nathan Rosen. «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete ?» *Physical Review* 47 (1935) : 777-780.

Engels, Friedrich. *Anti-Dühring : Monsieur E. Dühring bouleverse la science*. Traduit par Émile Bottigelli. 1878. Paris : Les Éditions Sociales, 1977.

———. *Dialectique de la nature*. 1883. Inachevé. Paris : Les Éditions Sociales, 1977.

———. *L'origine de la famille, de la propriété privée et de l'État*. Traduit par Jeanne Stern. 1883. Paris : Les Éditions Sociales, 1972.

Fényes, Imre. «Eine wahrscheinlichkeitstheoretische Begründung und Interpretation der Quantenmechanik». *Zeitschrift für Physik* 132, nº 1 (1952) : 81-106.

Fer, Francis. «Les solutions singulières des équations d'onde et la théorie de la double solution». Thèse de doct., Faculté des Sciences de Paris, 1956.

———. «Pourrissent de la science bourgeoise». *La Nouvelle Critique* 27 (1951) : 59-67.

———. «Une discussion à propos de l'indéterminisme en physique». *La Nouvelle Critique* 69 (1955) : 148-149.

Ferro-Luzzi, Massimiliano, Robert D. Tripp et Mason B. Watson. «Excited hyperon of mass 1520 Mev». *Physical Review Letters* 8, nº 1 (1962) : 28-31.

Feynman, Richard, Robert B. Leighton et Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics : Volume III : Quantum Mechanics*. New York, NY : Basic Books, 2011.

Flato, Moshé, Georges Rideau et Jean-Pierre Vigier. «Definition of P.C.T. operators for the relativistic-rotator model and the Bronzan-Low symmetry». *Nuclear Physics* 61 (1965) : 250-256.

Flato, Moshé, Daniel Sternheimer, Sternheimer Joël, Jean-Pierre Vigier et Gleb Wataghin. «On the masses of nonstrange pseudoscalar mesons and the generalized Klein-Gordon equation». *Nuovo Cimento A* 42, nº 2 (1966) : 431-434.

Fock, Vladimir A. «Critique épistémologique de théories récentes». *La Pensée* 91 (1960) : 8-15.

———. «Le système de Ptolémée et le système de Copernic à la lumière de la théorie générale de la relativité». In La Nouvelle Critique, *Questions scientifiques (Physique)*, 147-154.

Freistadt, Hans. «The Causal Formulation of Quantum Mechanics of Particles (the Theory of De Broglie, Bohm and Takabayasi)». *Supplemento al Nuovo Cimento* v, nº X (1957) : 1-70.

Frenkel, Yakov. «Die Elektrodynamik des rotierenden Elektron». *Zeitschrift für Physik* 37, nos 4–5 (1926) : 243-262.

Galilei, Galileo. *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*. 1632. Paris : Le Seuil, 2010.

Gell-Mann, Murray. «A schematic model of baryons and mesons». *Physics Letters* 8, nº 3 (1964) : 214-215.

———. «The interpretation of the new particles as displaced charge multiplets». *Nuovo Cimento* 4, nº 2 (1956) : 848-866.

George, André, éd. *Louis de Broglie. Physicien et penseur*. Paris : Albin Michel, 1952.

Halbwachs, Francis. «A New Classification of Elementary Particles and Resonances». *Nuovo Cimento* XXVIII, nº 4 (1963) : 695-705.

———. «De la connaissance du monde physique». *La Pensée* 17 (1948) : 79-86.

———. *Matérialisme dialectique et sciences physicochimiques : Cours de philosophie, fascicule VI*. Les cours de l'Université Nouvelle. Paris : Éditions sociales, 1946.

———. «Matérialisme et physique quantique». *La Nouvelle Critique* 79 (1956) : 113-127.

———. «Recherches sur la mécanique du corpuscule tournant relativiste et l'hydrodynamique relativiste des fluides dotés d'une densité de moment angulaire interne». Thèse de doct., Faculté des Sciences de Paris, 1958.

———. «Rotation instantanée et angle d'Euler dans l'espace-temps». *Annales de l'Institut Henri Poincaré* 16, nº 3 (1959) : 145-160.

———. «The conformal group as a candidate for the relativistic extension of elementary particle symmetries». *Nuovo Cimento A* 49, nº 4 (1967) : 517-539.

———. «The Rotator of Elementary Particles and the Baryon Masses». *Progress of Theoretical Physics* 32, nº 6 (1964) : 940-949.

———. *Théorie relativiste des fluides à Spin*. Paris : Gauthier-Villars, 1960.

———. «Une tentative pour édifier une microphysique matérialiste. A propos de la thèse de J.P. Vigier». *La Pensée* 61 (1955) : 36-48.

Halbwachs, Francis, Pierre Hillion et Jean-Pierre Vigier. «Internal Motions ol Relativistic Fluid Masses». *Nuovo Cimento* XV, nº 2 (1960).

———. «Théorie mathématique des angles d'Euler dans l'espace-temps». *Annales de l'Institut Henri Poincaré* 16, nº 3 (1959) : 115-143.

Halbwachs, Francis, Jean-Marie Souriau et Jean-Pierre Vigier. «Le groupe d'invariance associé aux rotateurs relativistes et la théorie bilocale». *Journal de Physique et le Radium* 22, nº 7 (1961) : 393-406.

Halbwachs, Francis, et Jean-Pierre Vigier. «Lie Relations Associated with Relativistic Rotators and Bilocal Theory». *Nuovo Cimento* XVI, nº 3 (1960).

———. «Theoretical Prediction of New Heavy Bosons (Especially Heavy K-Mesons) in the Frame of the Rotator Model of Elementary Particles». *Nuovo Cimento* XXX, nº 1 (1963) : 469-475.

Hara, Osamu, et Tetsuo Goto. «Rigid Sphere Model of Elementary Particles and the Electromagnetic Field». *Progress of Theoretical Physics* 33, nº 5 (1965) : 907-931.

Hara, Osamu, Tetsuo Goto, S. Y. Tsai et Haruichi Yabuki. «Deformable Sphere Model of Elementary Particles and its Relation to Quark». *Progress of Theoretical Physics* 39, nº 1 (1968) : 203-227.

Hegel, Georg Wilhelm Friedrich. *Encyclopédie des sciences philosophiques I : La science de la logique*. Traduit par Bernard Bourgeois. 1830. Paris : Vrin, 1986.

Heisenberg, Werner. *La partie et le tout : Le monde de la physique atomique*. Paris : Flammarion, 2010.

———. «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik». *Zeitschrift für Physik* 43, nº 3 (1927) : 172-198.

Hillion, Pierre, et Jean-Pierre Vigier. «Les ondes associées à une structure interne des particules». *Annales de l'Institut Henri Poincaré* 17, nº 3 (1962) : 149-208.

Jdanov, Andreï. *Sur la littérature, la philosophie et la musique*. 2nd édition. Préface d'Aragon. Paris : Éditions de la Nouvelle Critique, 1950.

Jönsson, Claus. «Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten». *Zeitschrift für Physik* 161 (1961) : 454-474.

Jordan, Pascual. *Die Physik des 20. Jahrhunderts*. Braunschweig : Vieweg, 1936.

Joyeux, Jean. «A propos de la lutte idéologique en physique». *La Nouvelle Critique* 76 (1956) : 103-113.

Katayama, Yasuhisa, Jean-Pierre Vigier et Hideki Yukawa. «Letters to the Editor : A theory of weak interaction based on a rotator model». *Progress of Theoretical Physics* 29, nº 3 (1963) : 470-472.

———. «Letters to the Editor : An Approach to the Unified Theory of Elementary Particles». *Progress of Theoretical Physics* 29, nº 3 (1963) : 468-470.

Keller, Joseph B. «Bohm's Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables». *Physical Review* 89 (1953) : 1040-1041.

Kleman, Maurice. «Mouvements internes d'une particule relativiste». *Journal de Physique et le Radium* 22, nº 7 (1961) : 435-442.

Körner, Stephan, éd. *Observation and Interpretation, a Symposium of Philosophers and Physicists*. Proceedings of the 9th Symposium of the Colston Research Society Held in the University of Bristol, April 1st–April 4th, 1957. Londres : Butterworks Scientific publications, 1957.

La Nouvelle Critique, éd. *Questions scientifiques (Physique)*. Paris : Les Éditions de la Nouvelle Critique, 1952.

Laberenne, Paul. «Un grand débat scientifique». *La Pensée* 91 (1960) : 7.

Landau, Lev. «Theory of the superfluidity of helium II». *Journal of Physics USSR* 5 (1941) : 71.

Langevin, Paul. «La physique moderne et le déterminisme». *La Pensée* 1 (1939) : 1-14.

Le Bellac, Michel, Jean-Marc Lévy-Leblond, François Lurçat et Jean-Pierre Vigier. «Débat. Physique moderne : que peut le marxisme ?» *Clarté* 53 (1964).

Lederman, Leon M., et Dick Teresi. *The God Particle : If the Universe Is the Answer, What Is the Question ?* New York, NY : Dell Publishing, 1993.

Lefèbvre, Henri. *Problèmes actuels du marxisme*. Paris : Presses Universitaires de France, 1958.

Lénine, Vladimir I. «Léon Tolstoï, miroir de la révolution russe». In *Œuvres*, 10 : 220-227. 1908. Publié dans *Le Prolétariat* nº 35, le 24 septembre 1908. Paris : Éditions sociales, 1962.

———. «Liberté de critique et unité d'action». In *Œuvres*, 10 : 465-467. 1906. Publié dans *la Volna* le 20 mai 1906. Paris : Éditions sociales, 1962.

———. *Matérialisme et Empiriocriticisme*. T. 14 de *Œuvres*. 1908. Paris : Éditions sociales, 1962.

Lochak, Georges. «Sur les critiques de l'interprétation causale de la théorie des quanta». *La Nouvelle Critique* 93 (1957) : 123-140.

Lurçat, François. «La science et les hommes en Union soviétique». *La Nouvelle Critique* 90 (1957) : 97-125.

———. «La thèse de Jean Pierre Vigier et l'état actuel de la physique quantique». *La Nouvelle Critique* 62 (1955) : 176-183.

———. «Lettre à Maurice Nadeau». *La Nouvelle Critique* 84 (1957) : 61-68.

———. «Réflexions sur les particules élémentaires». *La Pensée* 98 (1961) : 68-96.

———. «Sur le matérialisme dialectique et la physique». *La Nouvelle Critique* 97 (1958) : 135-147.

———. «Sur le matérialisme dialectique et la physique». Suite de la première partie de l'article paru dans le numéro 97, *La Nouvelle Critique* 98 (1958) : 133-152.

———. «Une discussion à propos de l'indéterminisme en physique». *La Nouvelle Critique* 69 (1955) : 159-165.

Madelung, Erwin. *Die mathematischen Hilfsmittel des Physikers*. Berlin : Springer Verlag, 1922.

———. «Quantentheorie in hydrodynamischer Form». *Zeitschrift für Physik* 40 (1926) : 322-326.

Marx, Karl. *La guerre civile en France : Adresse du Conseil général de l'Association internationale des Travailleurs*. 1871. Paris : Mille et une nuits, 2007.

———. «Le 18 Brumaire de Louis Bonaparte». In *Les Luttes de Classes en France*, édition établie et traduite par Maximilien Rubel, 169-314. 1852. Paris : Folio, 2007.

———. *Le Capital, Livre Premier*. Traduit par Joseph Roy. 1872. Paris : Les Éditions Sociales, 1969.

———. *Le Capital, Livre Premier*. Traduit par Jean-Pierre Lefebvre. Paris : Quadrige/Presses Universitaires de France, 1993.

Marx, Karl, et Friedrich Engels. *Correspondance : Juillet 1870 – Décembre 1871*. Sous la direction de Gilbert Badia. Traduit par Jean Mortier, Claude Mainfroy et Jean Wetzler. T. XI. Paris : Éditions sociales, 1985.

Mathisson, Myron. «Das zitternde Elektron und seine Dynamik». *Acta Physica Polonica* 6 (1937) : 218-227.

Møller, Christian. «Sur la dynamique des systèmes ayant un moment angulaire interne». *Annales de l'Institut Henri Poincaré* 11, nº 5 (1949) : 251-278.

Nakano, Tadao. «A Relativistic Field Theory of an Extended Particle, I». *Progress of Theoretical Physics* 15, nº 4 (1956) : 333-368.

Nakano, Tadao, et Kazuhiko Nishijima. «Letters to the Editor : Charge Independance for V-Particles». *Progress of Theoretical Physics* 10, nº 5 (1953) : 581-582.

Nelson, Edward. «Derivation of the Schrödinger Equation from Newtonian Mechanics». *Physical Review* 150, nº 4 (1966) : 1079-1085.

———. *Quantum fluctuations*. Princeton, NJ : Princeton University Press, 1985.

Nishijima, Kazuhiko. «Charge Independence Theory of V Particles». *Progress of Theoretical Physics* 13, nº 3 (1955) : 285-304.

Orcel, Jean. «Structure en évolution et niveaux d'organisation de la matière. Importance des sciences minéralogiques». *La Pensée* 102 (1962) : 16-38.

Pannekoek, Anton. *Lenin As Philosopher : A Critical Examination of the Philosophical Basis of Leninism*. Traduit par Lance Richey. 1938. Milwaukee, WI : Marquette University Press, 2003.

Pascal, Blaise. *Pensées*. Édition de Léon Brunschvicg. Paris : Librairie Hachette, 1980.

Pauli, Wolfgang. «Remarques sur le problème des paramètres cachés dans la mécanique quantique et sur la théorie de l'onde pilote». In George, *Louis de Broglie. Physicien et penseur*, 33-42.

———. *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. Band IV, Teil I : 1950–1952*. Sous la direction de Karl von Meyenn. Berlin : Springer, 1996.

———. «Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons». *Zeitschrift für Physik* 43, nº 9 (1927) : 601-623.

Popper, Karl R. «The propensity interpretation of the calculus of probability, and the quantum theory». In Körner, *Observation and Interpretation, a Symposium of Philosophers and Physicists*, 65-70.

Pryce, Maurice H. L. «The Mass-Centre in the Restricted Theory of Relativity and Its Connexion with the Quantum Theory of Elementary Particles». *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 195, nº 1040 (1948) : 62-81.

Rauch, Helmut, Anton Zeilinger, Badurek Gerald, A. Wilfing, W. Bauspiess et Ulrich Bonse. «Verification of coherent spinor rotation of fermions». *Physics Letters A* 54, nº 6 (1975) : 425-427.

Régnier, André. «Sur la conservation de la charge». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 235 (1954) : 1370-1372.

Régnier, André, Évry Schatzman et Jean-Pierre Vigier. «Sur la répartition statistique des mouvements des particules en Mécanique quantique». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 234 (1952) : 410-412.

Rosenfeld, Léon. «L'évidence de la complémentarité». In George, *Louis de Broglie. Physicien et penseur*, 43-66.

———. «Misunderstandings about the foundations of quantum theory». In Körner, *Observation and Interpretation, a Symposium of Philosophers and Physicists*, 41-45.

Sakata, Shoichi. «On Interpretation of the Quantum Mechanics – What is of importance is not interpretation but revolution». Publié originellement dans *Kagaku*, nº 29 (1959) :626–631, *Progress of Theoretical Physics Supplement* 29, nº 50 (1971) : 171-184.

———. «Taketani's "Three-Stage Theory"». *Progress of Theoretical Physics Supplement* 50 (1971) : 9-11.

Sartre, Jean-Paul, Roger Garaudy, Jean Hyppolite, Jean-Pierre Vigier et Jean Orcel. *Marxisme Et Existentialisme : Controverse sur la dialectique*. Paris : Plon, 1962.

Schatzman, Évry. «Cosmologie». *La Pensée* 33 (1950) : 104-106.

———. «La théorie cosmogonique de Milne–Haldane». *La Pensée* 25 (1949) : 77-90.

———. «La thèse de Jean-Pierre Vigier sur "L'inteprétation causale de la physique quantique"». *Cahiers du communisme*, février 1955, 183-193.

Schatzman, Évry. «Les astronomes soviétiques devant la nature». *La Pensée* 35 (1951) : 123-126.

———. «Les soucoupes volantes». *La Pensée* 36 (1951) : 87-90.

———. «Physique quantique et réalité». *La Pensée* 42–43 (1952) : 110-122.

Schönberg, Mário. «A non-linear generalization of the Schrödinger and Dirac equations». *Nuovo Cimento* VII, nº 5 (1954) : 674-682.

———. «On the Hydrodynamical Model of the Quantum Mechanics». *Nuovo Cimento* XII, nº 1 (1954) : 103-133.

———. «Vortex Motions of the Madelung Fluid». *Nuovo Cimento* I, nº 4 (1955) : 543-580.

Schrödinger, Erwin. «An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules». *Physical Review* 28, nº 6 (1926) : 1049-1070.

———. «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik». *Naturwissenschaften* 23, nº 48 (1935) : 807-812.

———. «La situation actuelle en mécanique quantique». In *Physique quantique et représentation du monde*, traduit par F. de Jouvenel, Annie Bitbol-Hespériès et Michel Bitbol, 90-140. Paris : Le Seuil, coll. « Points-Sciences», 1992.

Sobolev, Serguei L. «La critique scientifique, l'esprit novateur et le dogmatisme». *La Nouvelle Critique* 61 (1955) : 205-2011.

Solomon, Jacques. «Du "radium artificiel" à la conception de l'atome». *La Pensée* 1 (1939) : 92-97.

———. «Les ondes de probabilité». *La Pensée* 2 (1939) : 87-90.

———. «Sur l'indéterminisme de la mécanique quantique». *Journal de Physique et le Radium* 4, nº 1 (1933) : 34-37.

Solomon, Jacques, et Léon Rosenfeld. «Sur la théorie quantique du rayonnement». *Journal de Physique et le Radium* 2 (1931) : 139-147.

———. «Zur Theorie der Hohlraumstrahlung». *Die Naturwissenschaften* 19, nº 18 (1931) : 376.

Svechnikov, Gennadii A. «La lutte contre l'indéterminisme dans la mécanique quantique». *La Pensée* 61 (1955) : 49-57.

Takabayasi, Takehiko. «Exposé n°3 des 11 décembre 1956 et 8 janvier 1957 : Relativistic hydrodynamics of the Dirac matter». *Séminaire de Théories Physiques dirigé par Mr Louis de Broglie*, 1957.

———. «Hydrodynamical description of the Dirac equation». *Nuovo Cimento* 3, nº 2 (1956) : 233-241.

———. «Letter to the Editor : Relativistic Hydrodynamics Equivalent to the Dirac Equation». *Progress of Theoretical Physics* 13, nº 2 (1955) : 222-224.

———. *Netsugakushi*. Tokyo : Minshushugi kagakusha kyôkai, 1948. Tokyo : Kaimeisha, 1999.

———. «On the Formulation of Quantum Mechanics associated with Classical Pictures». *Progress of Theoretical Physics* 8 (2 1952) : 143-182.

———. «Relativistic Hydrodynamics of the Dirac Matter». *Progress of Theoretical Physics Supplement* 4 (1957) : 1-80.

———. «Remarks on the Formulation of Quantum Mechanics with Classical Pictures and on Relations between Linear Scalar Fields and Hydrodynamical Fields». *Progress of Theoretical Physics* 9 (3 1953) : 187-222.

———. «The formulation of quantum mechanics in terms of an ensemble in phase space». *Progress of Theoretical Physics* 4–5 (11 1954) : 341-373.

———. «The Vector Representation of Spinning Particle in the Quantum Theory, I». *Progress of Theoretical Physics* 14, nº 4 (1955) : 283-302.

———. «Theory of One-Dimensional Relativistic Elastic Continuum for the Model of Particles and Resonances». In *Quantum Mechanics, Determinism, Causality, and Particles*, sous la direction de M. Flato, Z. Maric, D. Milosevic, D. Sternheimer et Jean-Pierre Vigier, 179-216. Dordrecht : D. Reidel Publishing Company, 1976.

Takabayasi, Takehiko, et Jean-Pierre Vigier. «Description of Pauli Matter as a Continuous Assembly of Small Rotating Bodies». *Progress of Theoretical Physics* 18, nº 6 (1957) : 573-590.

Temple, George. «The physical interpretation of quantum mechanics». *Proceedings of the Physical Society* 41 (1928) : 60-82.

Terletski, Jakow P. «Le problème de la causalité en mécanique quantique». *La Pensée* 64 (1955) : 14-20.

Terletski, Jakow P. «Problèmes du développement de la théorie quantique». In La Nouvelle Critique, *Questions scientifiques (Physique)*, 131-146.

———. «Vers les profondeurs des particules élémentaires». *La Pensée* 95 (1961) : 29-35.

Tomonaga, Sin-itiro. *Quantum Mechanics. Volume 1 : Old Quantum Theory*. Traduit par Koshiba. Tozai-Shuppan, 1948. Amsterdam : North-Holland Company, 1962.

Tonnelat, Marie-Antoinette. «La notion de réalité physique et l'œuvre de Louis de Broglie». In George, *Louis de Broglie. Physicien et penseur*, 145-152.

Valentini, Antony. «Signal-locality, uncertainty, and the subquantum H-theorem. II». *Physics Letters A* 158 (1991).

van Winter, Clasine. «Space-time rotations and isobaric spin». Thèse de doct., Université de Groningue, 1957.

Vassails, Gérard. «Dialectique du hasard». *La Pensée* 36 (1951) : 21-30.

———. «Documents des journées nationales d'études des intellectuels communistes (Ivry, 29-30 mars 1953)». *La Nouvelle Critique* 45 (1953) : 146-152.

———. «La physique soviétique ... sur pièces». *La Nouvelle Critique* 38 (1952) : 128-136.

———. «La politisation des atomes ou le prétendu "indéterminisme" en physique». *La Nouvelle Critique* 12 (1950) : 57-72.

———. «Le soi-disant indéterminisme en physique quantique». *Les Cahiers Rationalistes* 116 (1951) : 3-28.

———. «Louis de Broglie et l'indéterminisme physique». *La Nouvelle Critique* 43 (1953) : 133-137.

Vavilov, Sergey Ivanovich. «Lénine et la physique moderne». *La Pensée* 23 (1949) : 27-34.

Vigier, Jean-Pierre. «À propos de la théorie du comportement des micro–objets individuels». *Recherches internationales à la lumière du Marxisme* 4 (1957) : 130-160.

———. «Étude sur les suites infinies d'opérateurs hermitiens». Thèse de doct., Université de Genève, 1946.

———. «Introduction géométrique de l'onde pilote en théorie unitaire affine». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 233 (1951) : 1010-1013.

———. «Introduction géométrique des particules élémentaires en théorie unitaire affine». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 232 (1951) : 1187-1189.

———. «Le matérialisme d'Einstein et l'æther de Dirac». *Communications* 41 (1985) : 27-61.

———. «Lénine philosophe». *La Pensée* 51 (1953) : 92-96.

———. «Les nouvelles particules et la révolution de la microphysique». *La Nouvelle Critique* 99 (1958) : 129-134.

———. «Mécanique ondulatoire dans l'espace de configuration». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 235 (1954) : 1372-1375.

———. «Physique relativiste et physique quantique». In *La physique quantique restera-t-elle indéterministe ?*, par Louis de Broglie, 89-111. Paris : Gauthier-Villars, 1953.

———. «Pour la défense de la recherche scientifique française». *La Nouvelle Critique* 72 (1956) : 5-10.

———. «Quelques problèmes physiques posés par les thèses de Lénine». *La Pensée* 57 (1954) : 60-65.

———. «Quelques résultats complémentaires à la théorie de l'itération des opérateurs de M. Wavre». *Compte rendu des séances de la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève* 59 (1942) : 159-162.

———. «Recherches sur l'interprétation causale de la théorie des quanta». Thèse de doct., Faculté des Sciences de Paris, 1954.

———. «Remarques sur l'article du professeur Terletski». *La Pensée* 64 (1955) : 21-26.

———. «Soutenir les condamnés, défendre les 121». *L'Humanité*, 3 octobre 1961.

———. *Structure des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*. Paris : Gauthier-Villars, 1956.

Vigier, Jean-Pierre. «The concept of probability in the frame of the probabilistic interpretation of quantum mechanics». In Körner, *Observation and Interpretation, a Symposium of Philosophers and Physicists*, 71-77.

———. «Théorie des niveaux dialectique de la nature». *La Pensée* 99 (1961) : 36-48.

Vigier, Jean-Pierre, et Louis de Broglie. «Table des particules élémentaires associées au nouveau modèles étendu des particules éllémentaires». *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 256 (1963) : 3551-3556.

Vigier, Jean-Pierre, et Jakow P. Terletski. «On the physical meaning of negatives probabilities». *Journal of Experimental and Theoretical Physics* 13, nº 2 (1961) : 403-412.

von Neumann, John. «Développement axiomatique de la théorie». In *Les fondements mathématiques de la mécanique quantique*, traduit par Alexandre Proca. Berlin : Springer Verlag, 1932. Sceaux : Jacques Gabay, 1988.

Weyssenhoff, Jan W., et Raabe Antoni. «Relativistic Dynamics of Spin Fluids and Spin Particles». *Acta Physica Polonica* 6 (1947) : 7-18.

Wheeler, John Archibald, et Wojciech Hubert Zurek, éds. *Quantum Theory of Measurement*. Princeton, NJ : Princeton University Press, 1983.

Yukawa, Hideki. «On the Interaction of Elementary Particles. I». *Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan* 17 (1935) : 48-57.

———. «Quantum Theory of Non-Local Fields I. Free Fields». *Physical Review* 77, nº 2 (1950) : 219-226.

Yvon, Jacques. «L'équation de Dirac-Madelung». *Journal de Physique et le Radium* 1 (1940) : 18-24.

Zweig, George. «An SU(3) model for strong interaction symmetry and its breaking». *CERN Report* 8182/TH. 401 (1964).

———. «An SU(3) model for strong interaction symmetry and its breaking II». *CERN Report* 8419/TH. 412 (1964).

Sources secondaires

Publications

Atten, Michel. «La physique en souffrance, 1850-1914». In *La formation polytechnicienne, 1794-1994*, sous la direction de Bruno Belhoste, Amy Dahan Dalmedico et Antoine Picon, 217-244. Paris : Dunod, 1994.

Bacciagaluppi, Guido, et Antony Valentini. *Quantum Theory at the Crossroads : Reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2009.

Baracca, Angelo, Silvio Bergia et Flavio Del Santo. «The origins of the research on the foundations of quantum mechanics (and other critical activities) in italy during the 1970s». *arXiv.org*, 2016. https://arxiv.org/abs/1608.05197.

Beller, Mara. «Born's Probabilistic Interpretation : A Case Study of "Concepts in Flux"». *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 21, nº 4 (1990) : 563-588.

———. «The birth of Bohr's complementarity : The context and the dialogues». *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 23, nº 1 (1992) : 147-180.

Bensaude-Vincent, Bernadette. *Langevin, 1872–1946 : Science et vigilance*. Paris : Belin, 1987.

Besson, Virgile. «VIGIER, Jean-Pierre». Sous la direction de Claude Pennetier. *Le Maitron en Ligne*, 11 juin 2016. http://maitron-en-ligne.univ-paris1.fr/spip.php?article181611.

Bird, Kai, et Martin J. Sherwin. *American Prometheus : The Triumph And Tragedy Of J. Robert Oppenheimer*. New York City, NY : Vintage Books, 2005.

Bitbol, Michel. «Jean-Louis Destouches : théories de la prévision et individualité». *Philosophia Scientiæ* 5 (2001) : 1-30.

Bitsakis, Eftichios. «Causalité et localité en microphysique». *La Pensée*, nº 235 (1983) : 103-124.

———. *La nature dans la pensée dialectique*. Paris : L'Harmattan, 2001.

Bloor, David. *Knowledge and social imagery*. Londres : Routledge Kegan & Paul, 1976.

Bonolis, Luisa. «From the Rise of the Group Concept to the Stormy Onset of Group Theory in the New Quantum Mechanics. A saga of the invariant characterization of physical objects, events and theories». *Nuovo Cimento* 4–5 (2004).

Bourgeois, Guillaume. *La véritable histoire de l'Orchestre Rouge*. Paris : Nouveau Monde édition, 2015.

Brillant, Bernard. *Les clercs de 68*. Paris : Presses Universitaires de France, 2003.

Broué, Pierre. *Histoire de l'Internationale communiste (1919–1943)*. Paris : Fayard, 1997.

Bustamante, Martha Cecilia. «Jacques Solomon (1908–1942) : profil d'un physicien théoricien dans la France des années trente». *Revue d'histoire des sciences* 50, nº 1 (1997) : 49-88.

Callender, Craig. «The Emergence and Interpretation of Probability in Bohmian Mechanics». *Studies in History and Philosophy of Science Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38, nº 2 (2007) : 351-370.

Camilleri, Kristian. «Bohr, Heisenberg and the divergent views of complementarity». *Studies in History and Philosophy of Science Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38, nº 3 (2007) : 514-528.

———. «Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation». *Perspectives on Science* 17, nº 1 (2009) : 26-57.

Canguilhem, Georges. *Études d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie*. 1994. Vrin, 2002.

Cao, Tian Yu. *Conceptual developments of 20th century field theories*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1997.

Carreau, Pascal, éd. *Le Parti communiste français et l'année 1956*. Fondation Gabriel Péri, 2007.

Cassidy, David C. *Beyond Uncertainty : Heisenberg, Quantum Physics, and The Bomb*. New York City, NY : Bellevue Literary Press, 2010.

Caute, David. *Communism & the French Intellectuals 1914–1960*. New York City, NY : Macmillan, 1964.

Charbonnat, Pascal. *Histoire des philosophies matérialistes*. Paris : Éditions Syllepse, 2007.

Chevalley, Catherine. Introduction à *Physique atomique et connaissance humaine*, par Niels Bohr, 17-140. Sous la direction de Catherine Chevalley. Traduit par Edmond Bauer et Rolland Omnès. Paris : Gallimard, 1991.

Chilvers, Christopher. Postface à *Les Racines sociales et économiques des Principia de Newton : Une rencontre entre Newton et Marx à Londres en 1931*, par Boris Hessen, 179-206. Traduit par Serge Guérout. 1931. Paris : Vuibert, 2006.

Claudia, Patrignani, et al. «Review of Particle Physics». *Chinese Physcis C* 40, nº 10 (2016).

Coen, Deborah R. *Vienna in the Age of Uncertainty : Science, Liberalism, and Private Life*. Chicago, IL : University of Chicago Press, 2007.

Colin, Cécile. «Jacques Solomon et l'interprétation de la théorie quantique». *Revue d'histoire des sciences* 63, nº 1 (2010) : 221-246.

Conner, Clifford D. *Histoire populaire des sciences*. Traduit par Alexandre Freiszmuth. Paris : L'échapée, 2011.

Crease, Robert P. «The most beautiful experiment». *Physics World* 15 (2002) : 19-20.

Cross, Andrew. «The Crisis in Physics : Dialectical Materialism and Quantum Theory». *Social Studies of Science* 21, nº 4 (1991) : 735-759.

Crull, Elise, et Guido Bacciagaluppi, éds. *Grete Hermann : Between Physics and Philosophy*. Dordrecht : Springer Netherland, 2016.

Cushing, James T. *Philosophical Concepts in Physics : The Historical Relation between Philosophy and Scientific Theories*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1998.

———. *Quantum Mechanics : Historical contingency and the Copenhagen hegemony*. Chicago, IL : University of Chicago Press, 1994.

Darrigol, Olivier. «Cohérence et complétude de la mécanique quantique : l'exemple de "Bohr-Rosenfeld"». *Revue d'histoire des sciences* 44, nº 2 (1991) : 137-179.

———. «Elements of a Scientific Biography of Tomonaga Sin-itiro». *Historia scientiarum* 35 (1988) : 1-29.

———. «Empirical Challenges and Concept Formation in the History of Hydrodynamics». *Centaurus* 50, nº 3 (2008) : 214-232.

———. *From c-Numbers to q-Numbers*. Berkeley et Los Angeles, CA : University of California Press, 1992.

Darrigol, Olivier. « The Origin of Quantized Matter Waves ». *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 16, nº 2 (1986) : 197-253.

Daston, Lorraine, et Peter Galison. *Objectivity*. Cambridge, MA : MIT Press, 2007.

Dresden, Max. « Renormalization in historical perspective – The first stage : From Lorentz to Landau (and beyond) ». In *Renormalization*, sous la direction de Laurie M. Brown, 29-56. New York City, NY : Springer-Verlag, 1993.

Duchesnau, François. « Leibniz on the principle of continuity ». *Revue Internationale de Philosophie* 4, nº 48 (1994) : 141-160.

Eisenstaedt, Jean. *Eisntein et la relativité générale*. Paris : CNRS Éditions, 2013.

Ezawa, Hiroshi. « Takehiko Takabayashi (1919–1999) ». *Historia scientiarum* 10, nº 3 (2001) : 286-304.

Fitch, Val L., et Jonathan L. Rosner. « Elementary particle physics in the second half of the 20th century ». In *Twentieth Century Physics*, sous la direction de Laurie M. Brown, Abraham Pais et Brian Pippard, 2 : 635-768. Londres : Taylor & Francis Ltd, 1995.

Fleck, Ludwik. *Genèse et développement d'un fait scientifique*. Traduit par Nathalie Jas. 1935. Paris : Les Belles Lettres, 2005.

Forman, Paul. « Weimar culture, causality, and quantum theory : adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile environment ». *Historical Studies in the Physical Sciences* 3 (1971) : 1-115.

Freire Jr., Olival. « A Story Without an Ending : The Quantum Physics Controversy 1950–1970 ». *Science & Education* 12 (2003) : 573-586.

———. « L'interprétation de la mécanique quantique selon Paul Langevin ». *La Pensée* 292 (1993) : 117-134.

———. « La physique quantique et l'humanisation de la science ». Textes préparés à l'occasion du Colloque Paul Langevin, qui s'est tenu les 12 et 13 juin 1997 à Paris, *Épistémologiques* II (1 2002) : 111-126.

———. « Philosophy enters the optics laboratory : Bell's theorem and its first experimental tests (1965–1982) ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 37, nº 4 (2006) : 577-616.

———. « Quatum Controversy and Marxism ». *Historia scientiarum* 7, nº 2 (1997) : 137-152.

———. «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.

———. *The Quantum Dissidents : Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950–1990)*. Berlin : Springer, 2015.

Freudenthal, Gideon, et Peter McLaughlin. «Classical Marxist Historiography of Science : The Hessen-Grossmann-Thesis». In *The Social and Economic Roots of the Scientific Revolution : Texts by Boris Hessen and Henryk Grossmann*, sous la direction de Gideon Freudenthal et Peter McLaughlin, 278 : 41-102. Boston studies in the philosophy of science. Heidelberg : Springer Netherlands, 2009.

Friedman, Robert Marc. *The Politics of Excellence : Behind the Nobel Prize in Science*. New York City, NY : Times Books, 2001.

Frisch, Mathias. *Inconsistency, Asymmetry, and Non-Locality : A Philosophical Investigation of Classical Electrodynamics*. Oxford : Oxford University Press, 2005.

Galavotti, Maria Carla. «Operationism, probability mechanics and quantum». *Foundations of Science* 1 (1995) : 99-118.

Gayon, Jean. «De la catégorie de style en histoire des sciences». *Alliage* 26 (1996) : 13-25.

———. «On the Uses of the Category of Style in the History of Science». *Philosophy and Rhetoric* 32, n° 3 (1999) : 13-25.

Gilder, Louisa. *The Age of Entanglement : When Quantum Physics was Reborn*. New York City, NY : Alfred A. Knopf, 2008.

Gingras, Yves. «The New Dialectics of Nature». *Social Studies of Science* 27 (1997).

Goenner, Hubert F. M. «On the History of Unified Field Theories. Part II. (ca. 1930 – ca. 1965)». *Living Reviews in Relativity* 17, n° 5 (2014).

Gomas, Yves. «Jean Dufay (1896-1967) professeur, astrophysicien et directeur d'observatoires». Thèse de doct., Université Claude Bernard Lyon 1, 2017.

Götze, Heinz. *Springer-Verlag : History of a Scientific Publishing House : Part 2 : 1945–1992 Rebuilding – Opening Frontiers – Securing the Future*. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 1996.

Gouarné, Isabelle. *L'introduction du marxisme en France : Philosoviétisme et sciences humaines 1920–1939*. Rennes : Presses Universitaires de Rennes, 2013.

Gouarné, Isabelle. «ORCEL, Jean, François». Sous la direction de Claude Pennetier. *Le Maitron en Ligne*, 26 septembre 2013. http://maitron-en-ligne.univ-paris1.fr/spip.php?article147646.

Gouz, Simon. «Biographie d'une vision du monde : Les relations entre science, philosophie et politique dans la conception marxiste de J.B.S. Haldane». Thèse de doct., Université Claude Bernard Lyon 1, 2010.

———. *J.B.S. Haldane, la science et le marxisme : La vision du monde d'un biologiste*. Paris : Éditions Matériologiques, 2012.

Graham, Loren R. *Lysenko's Ghost : Epigenetics and Russia*. Cambridge, MA : Harvard University Press, 2016.

———. *Science, Philosophy, and Human Behavior in the Soviet Union*. New York City, NY : Columbia University Press, 1987.

Grimoult, Nicolas. «Internalisme contre externalisme». Chap. 7 in *Histoire de l'histoire des sciences*, 139-144. Pars, Genève : Libraire Droz, 2003.

Guicciardini, Niccolò. «Mathematics and the New Sciences». Chap. 8 in *The Oxford Handbook of the History of Physics*, sous la direction de Jed Z. Buchwald et Robert Fox, 226-264. Oxford : Oxford University Press, 2013.

Guzzo, Marcelo Moraes, et Norma Reggiani. «Mário Schenberg : Physicist, politician and art critic». In *The Second ICRANet César Lattes Meeting : Supernovae, Neutron Stars and Black Holes*, sous la direction d'Ulisses Barres de Almeida, Pascal Chardonnet, Rodrigo Picanco Negreiros, Jorge Rueda, Remo Ruffini, Vereshchagin Gregory et César Zen Vasconcellos. 1693. Melville, NY : AIP Publishing, 2015.

Hacking, Ian. *The Social Construction of What ?* Cambridge, MA : Harvard University Press, 1999.

Hankins, Thomas L. *Sir William Rowan Hamilton*. Baltimore, MD : Johns Hopkins University Press, 1980.

Hartz Maia, Thiago. «As heterodoxias quânticas e o olhar do historiador : uma história dos usos dos argumentos de Niels Bohr acerca da medição de campos quânticos (1930-1970)». Thèse de doct., Universidade Federal da Bahia, 2013.

Heurgon, Marc. *Histoire du P.S.U. 1 : La fondation et la guerre d'Algérie (1958–1962)*. Paris : Éditions La Découverte, 1994.

Hiley, Basil J., et F. David Peat, éds. *Quantum Implications : Esssays in Honour of David Bohm*. Londres : Routledge Kegan & Paul, 1987.

Hoddeson, Lillian, Paul V. Henriksen et Catherine L. Westfall. *Critical Assembly : A Technical History of Los Alamos during the Oppenheimer Years, 1943–1945*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2004.

Holland, Peter R. « Jean-Pierre Vigier at Seventy-Five : La Lutte Continue ». *Foundations of Physics* 25, nº 1 (1995) : 1-4.

———. *The Quantum Theory of Motion : An Account of the De Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1995.

Holmes, Frederic L. *Lavoisier and the Chemistry of Life : An exploration of Scientific Creativity*. Madison, WI : University of Wisconsin Press, 1985.

Howard, Don. « Who Invented the "Copenhagen Interpretation" ? A Study in Mythology ». *Philosophy of Science* 71, nº 5 (2004) : 669-682.

Ierodiakonou, Katerina, et Sophie Roux, éds. *Thought Experiments in Methodological and Historical Contexts*. Leyde : Brill, 2011.

Ito, Kenji. « Values of "pure science" : Nishina Yoshio's wartime discourse between nationalism and physics, 1940-1945 ». *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 33, nº 1 (2002) : 61-86.

Jackiw, Andrew. *Lectures on Fluid Dynamics : A Particle Theorist's View of Supersymmetric, Non-Abelian, Noncommutative Fluid Mechanics and d-Branes*. New York City, NY : Springer, 2002.

Jacobsen, Anja Skaar. « Crisis, Measurement Problems and Controversy in Early Quantum Electrodynamics : The Failed Appropriation of Epistemology in the Second Quantum Generation ». In *Weimar Culture and Quantum Mechanics : Selected Papers by Paul Forman and Contemporary Perspectives on the Forman Thesis*, sous la direction de Cathryn Carson, Alexei Kojevnikov et Helmuth Trischler, 375-397. Londres : Imprerial College Press, 2011.

———. *Léon Rosenfeld : Physics, Philosophy, and Politics in the Tewentieh Century*. Singapour : World Scientific, 2012.

———. « Léon Rosenfeld's Marxist defense of complementarity ». *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 37, nº supplément (2007) : 3-34.

Jacquemond, Louis-Pacal. *Irène Joliot-Curie*. Paris : Odile Jacob, 2014.

Jammer, Max. *Einstein and Religion*. Princeton, NJ : Princeton University Press, 1999.

———. *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York City, NY : John Wiley & Sons, 1974.

Jeffers, Stanley. « Preface ». In *Jean-Pierre Vigier and the Stochastic Interpretation of Quantum Mechanics*, iii-vi. Quebec : Apeiron, 2000.

Joravsky, David. *The Lysenko Affair*. Chicago, IL : University of Chicago Press, 1970.

Kaiser, David. *How the Hippies Saved Physics : Science, counterculture, and the Quantum revival*. New York City, NY : Norton, 2011.

———. « The Atomic Secret in Red Hands ? American Suspicions of Theoretical Physicists During the Early Cold War ». *Representations* 90 (2005) : 28-60.

———. « The Postwar Suburbanization of American Physics ». *American Quarterly* 56, nº 4 (2004) : 851-888.

Kim, Dong-Won. « The emergence of theoretical physics in Japan : Japanese physics community between the two World Wars ». *Annals of Science* 52, nº 4 (1995) : 383-402.

Kojevnikov, Alexei. « David Bohm and collective movement ». *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 33, nº 1 (2002).

———. « Probability, Marxism, and Quantum Ensembles ». *Yearbook of the European Culture of Science*, 2012, 211-235.

———. *Stalin's Great Science : The Times and Adventures of Soviet Physicists*. Londres : Imperial College Press, 2004.

Kožnjak, Boris. « The missing history of Bohm's hidden variables theory : The Ninth Symposium of the Colston Research Society, Bristol, 1957 ». À paraitre, *Studies in History and Philosophy of Science Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2017. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1355219817300539.

Kragh, Helge. *Dirac : A Scientific Biography*. New York City, NY : Cambridge University Press, 1990.

———. « Equation with the many fathers . The Klein – Gordon equation in 1926 ». *American Journal of Physics* 52, nº 11 (1984) : 1024-1033.

———. « Erwin Schrödinger and the Wave Equation : The Crucial Phase ». *Centaurus* 26, nº 2 (1982) : 154-197.

Krige, John. *American Hegemony and the Postwar Reconstruction of Science in Europe*. Cambridge, MA : MIT Press, 2006.

———. « Atoms for peace, scientific internationalism, and scientific intelligence ». *Osiris* 21, nº 1 (2006) : 161-181.

———. « The Peaceful Atom as Political Weapon : Euratom and American Foreign Policy in the Late 1950s ». *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 38, nº 1 (2008) : 5-44.

Lakatos, Imre. *Philosophical Papers, Volume 2 : Mathematics, science and epistemology*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1978.

Landsman, Nicolaas Pieter. « When champions meet : Rethinking the Bohr-Einstein debate ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B - Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 37 (2006) : 212-242.

Latour, Bruno. *Pandora's Hope : Essays on the Reality of Science Studies*. Cambridge, MA : Harvard University Press, 1999.

Lehner, Christoph, et Christian Joas. « The classical roots of wave mechanics : Schrödinger's transformations of the optical-mechanical analogy ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B - Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40, nº 4 (2009) : 338-351.

Lévi-Strauss, Claude. *La Pensée Sauvage*. Paris : Plon, 1962.

Lindzen, Richard S., Edward N. Lorenz et George W. Platzman, éds. *The atmosphere - a challenge : the science of Jule Gregory Charney*. Boston, MA : American meteorological society, 1990.

Locard, Henri. *Pourquoi les Khmers rouges*. Paris : Vendémiaire, 2013.

Lochak, Georges. *Louis de Broglie*. Paris : Flammarion, 1992.

———. « Quelques souvenirs d'un ami disparu : Dr. Takehiko Takabayashi (1919-1999) ». *Historia scientiarum* 10, nº 2 (2000) : 211-212.

Low, Morris. *Science and the building of a New Japan*. New York City, NY : Palgrave Macmillan, 2005.

Macherey, Pierre. *Pour une théorie de la Production Littéraire*. 1966. Paris : ENS Éditions, 2014.

Maleeh, Reza, et Parisa Amani. «Pragmatism, Bohr, and the Copenhagen interpretation of quantum mechanics». *International Studies in the Philosophy of Science* 27, nº 4 (2013) : 353-367.

Martinez, Jean-Philippe. «Vladimir Fock (1898–1974) : itinéraire externaliste d'une pensée internaliste : Antiréductionnisme et réalisme scientifique en physique moderne». Thèse de doct., Université Paris Diderot, 2017.

Matonti, Frédérique. *Intellectuels Communistes : Essai sur l'obéissance politique. La Nouvelle Critique (1967–1980)*. Paris : La Découverte, 2005.

Mehra, Jagdish. *The Golden Age of Theoretical Physics*. Singapour : World Scientific, 2001.

Mehra, Jagdish, et Helmut Rechenberg. *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 1 : The Historical Development of Quantum Theory : Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld Its Foundation and the Rise of Its Difficulties*. New York City, NY : Springer Verlag, 1982.

———. *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 2 : The discovery of quantum mechanics, 1925*. New York City, NY : Springer Verlag, 1982.

———. *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 3 : The Formulation of Matrix Mechanics and Its Modifications 1925-1926*. New York City, NY : Springer Verlag, 1983.

———. *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 4 : The Fundamental Equations of Quantum Mechanics 1925-1926. The Reception of the New Quantum Mechanics*. New York City, NY : Springer Verlag, 1983.

———. *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 5 : Erwin Schrödinger and the Rise of Wave Mechanics. Part 2 : The creation of Wave Mechanics, Early Response and Applications 1925-1926*. New York City, NY : Springer Verlag, 1987.

Moore, Walter. *Schrödinger : Life and thought*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1989.

Motoyama, Shozo. «Obituary. A Japanese Physicist in Brazil : Prof. Taketani (1911-2000)». *Historia scientiarum* 11, nº 1 (2001) : 112-126.

Mullet, Shawn Khristian. «Little Man : Four Junior Physicists and the Red Scare Experience». Thèse de doct., Harvard University, 2008.

Newman, Ezra T. «A Biased and Personal Description of GR at Syracuse University, 1951–1961». *Einstein Studies* 11 (2011) : 373-383.

Ohnuki, Yoshio. «Models for Elementary Particles and the Nagoya School 1955-1973». *Progress of Theoretical Physics* 122, nº 1 (2009) : 23-30.

Olwell, Russel. «Physical Isolation and Marginalization in Physics. David Bohm's Cold War Exile». *Isis*, nº 90 (1999) : 138-756.

Ory, Pascal, et Jean-François Sirinelli. *Les Intellectuels en France, de l'Affaire Dreyfus à nos jours*. Paris : Armand Colin, 1986.

Osnaghi, Stefano, Fábio Freitas et Olival Freire Jr. «The origin on the Everettian heresy». *Studies in History and Philosophy of Science Part B - Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40, nº 2 (2009) : 97-123.

Pais, Abraham. *Inward Bound : Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford : Oxford University Press, 1986.

———. *Subtle is the Lord : The science and the life of Albert Einstein*. Oxford : Oxford University Press, 1982.

Peat, F. David. *Infinite Potential : The Life and Times of David Bohm*. New York City, NY : Basic Books, 1997.

Pechenkin, Alexander. «The early statistical interpretations of quantum mechanics in the USA and USSR». *Studies in History and Philosophy of Science Part B - Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 43, nº 1 (2012) : 25-34.

Pessoa, Osvaldo, Olival Freire Jr. et Alexis De Greiff. «The Tausk Controversy on the Foundations of Quantum Mechanics : Physics, Philosophy, and Politics». *Physics in Perspective* 10, nº 2 (2008) : 138-162.

Pestre, Dominique. *Physique et physiciens en France, 1918-1940*. Paris : Éditions des archives contemporaines, 1992.

Pickering, Andrew. *Constructing Quarks : A Sociological History of Particle Physics*. Chicago, IL : University of Chicago Press, 1984.

———. *The Mangle of Practice : Time, Agency, and Science*. Chicago, IL : University of Chicago Press, 1995.

Pié i Valls, Blai. «L'experiment d'Stern i Gerlach en el seu context teòric : La història d'una reorientació». Thèse de doct., Université de Barcelone, 2015.

Pigenet, Michel. *Au cœur de l'activisme communiste des années de guerre froide : « La manifestation Ridgway »*. Paris : L'Harmattan, 1993.

Pinault, Michel. *Frédéric Joliot-Curie*. Paris : Éditions Odile Jacob, 2000.

———. « SCHATZMAN Évry, Léon ». Sous la direction de Claude Pennetier. *Le Maitron en Ligne*, 7 septembre 2015. http://maitron-en-ligne.univ-paris1.fr/spip.php?article168590.

Pollock, Ethan. *Stalin and the Soviet Science Wars*. Princeton, NJ : Princeton University Press, 2006.

Powers, Thomas. *Heisenberg's War : The Secret History Of The German Bomb*. Cambridge, MA : Da Capo Press, 2000.

Prugovečki, Eduard. « Realism, positivism, instrumentalism, and quantum geometry ». *Foundations of Physics* 22, n° 2 (1995) : 143-186.

Pulte, Helmut. « Jacobi's Criticism of Lagrange : The Changing Role of Mathematics in the Foundations of Classical Mechanics ». *Historia Mathematica* 28 (1998) : 154-184.

Reichenbach, Hans. *Experience and Prediction : An Analysis of the Foundations and the Structure of Knowledge*. University of Chicago Press, 1938. Notre-Dame, IN : University of Notre Dame Press, 2006.

Riggs, Peter J. *Quantum Causality : Conceptual Issues in the Causal Theory of Quantum Mechanics*. Dordrecht : Springer, 2009.

Robinson, Andrew. *The last man who knew everything*. New York City, NY : Pi Press, 2006.

Rose, Paul Lawrence. *Heisenberg and the Nazi Atomic Bomb Project, 1939–1945 : A Study in German Culture*. Berkeley et Los Angeles, CA : University of California Press, 2001.

Salmon, Wesley C. *Logic*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall, 1973.

Schweber, Silvan S. *In the Shadow of the Bomb : Oppenheimer, Bethe, and the Moral Responsibility of the Scientist*. Princeton, NJ : Princeton University Press, 2007.

———. *QED and the men who made it : Dyson, Feynman, Schwinger and Tomonaga*. Princeton, NJ : Princeton University Press, 1994.

———. « The Empiricist Temper Regnant : Theoretical Physics in the United States 1920-1950 ». *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 17, nº 1 (1986) : 55-98.

Shinn, Therry, et Pascal Ragouet. *Controverses sur la science : Pour une sociologie transversaliste de l'activité scientifique*. Paris : Raisons d'agir, 2005.

Siegmund-Schultze, Reinhard. « The Emancipation of Mathematical Research Publishing in the United States from German Dominance (1878–1945) ». *Historia Mathematica* 24 (1997) : 135-166.

Soler, Léna. « The Convergence of Transcendental Philosophy and Quantum Physics : Grete Henry-Hermann's 1935 Pioneering Proposal : Transcendental Perspectives on Modern Physics ». In *Constituting Objectivity*, sous la direction de Michel Bitbol, Pierre Kerszberg et Jean Petitot, 329-344. Springer, 2009.

Średniawa, Bronisław. « Myron Mathisson's and Jan Weyssenhoff's Work on the Problem of Motion in General Relativity ». In *Studies in the History of General Relativity*, sous la direction de Jean Eisenstaedt et Anne J. Kox, 400-406. Boston, MA : Birkhäuser, 1992.

Staley, Kent W. « Lost Origins of the Third Generation of Quarks : Theory, Philosophy, and Experiment ». *Physics in Perspective* 3 (2001) : 210-229.

———. *The Evidence for the Top Quark : Objectivity and Bias in Collaborative Experimentation*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2011.

Takabayasi, Takehiko. « Some characteristic aspects of early elementary particle theory in Japan ». In *The birth of particle physics*, sous la direction de Laurie M. Brown et Lillian Hoddeson, 294-303. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1987.

Tanona, Scott. « Uncertainty in Bohr's response to the Heisenberg microscope ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B - Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 35, nº 3 (2004) : 483-507.

Uhlenbeck, George E. « Book Review - Quantum Theory : Quantum Mechanics. vol. 1, Old Quantum Theory. Sin-Itiro Tomonaga ». *Science* 140, nº 3569 (1963) : 386.

Uno, Shigeki. « La Modernisation politique au Japon et l'idée de subjectivité chez Maruyama Masao ». *Ebisu* 32 (2004) : 67-83.

Uztopal, Deniz. «La réception en France du lyssenkisme, les scientifiques communistes français et la conceptualisation de la "science prolétarienne" (1948-1956)». *Cahiers d'histoire. Revue d'histoire critique* 122 (2014) : 121-141.

———. «Pouvoir ideologique et savoir scientifique. L'histoire sociale de la Science et des scientifiques communistes français dans la Guerre froide (1945-1956)». Thèse de doct., Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2012.

Verdès-Leroux, Jeannine. *Au service du Parti : Le parti communiste, les intellectuels et la culture (1944–1956)*. Paris : Fayard/Éditions de Minuit, 1983.

———. «la guerre d'Algérie dans la trajectoire des intellectuels communistes». In *La guerre d'Algérie et les intellectuels français*, sous la direction de Jean-Pierre Rioux et Jean-François Sirinelli, 307-326. Bruxelles : Éditions Complexe, 1991.

———. *Le réveil des somnambules : Le parti communiste, les intellectuels et la culture (1956–1985)*. Paris : Fayard/Éditions de Minuit, 1987.

Vickers, Peters. *Understanding Inconsistant Science*. Oxford : Oxford University Press, 2013.

Vila Valls, Adrien. «Entre causalisme et positivisme La réception épistémologique de la mécanique quantique par les théoriciens français de la génération de l'entre-deux-guerres». *Revue d'histoire des sciences* 68, nº 2 (2015) : 475-507.

———. «Louis de Broglie et la diffusion de la mécanique quantique en France (1925-1960)». Thèse de doct., Université Claude Bernard Lyon 1, 2012.

Whitaker, Andrew. «Solomon's Argument on Hidden Variables in Quantum Theory». *Foundations of Physics* 37, nº 6 (2007) : 989-997.

Wick, David. *The Infamous Boundaries : Seven Decades of Heresy in Quantum Physics*. Boston, MA : Birkhäuser, 1995.

Wolikow, Serge. «Les gauches, l'antifascisme et le pacifisme». In *Histoire des gauches en France*, sous la direction de Gilles Candar et Jean-Jacques Becker, 2 : 357-374. Paris : Éditions La Découverte, 2005.

Wyatt, Robert E. *Quantum Dynamics with Trajectories : Introduction to Quantum Hydrodynamics*. New York City, NY : Springer, 2005.

Yukawa, Hideki. *L'itinéraire intellectuel d'un physicien japonais : Tabibito : le voyageur*. Paris : Belin.

Zinn, Howard. *Une histoire populaire des États-Unis : De 1492 à nos jours*. Traduit par Frédéric Cotton. Paris : Agone, 2002.

Entretiens

Bohm, David. Entretien avec Maurice Wilkins, 22 décembre 1986. AIP Oral History Interviews. https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/32977-6.

Cufaro Petroni, Nicola. Correpondance personnelle avec l'auteur, février 2014.

Lochak, Georges. Entretien avec l'auteur, 11 mars 2014.

Schatzman, Évry. Entretien avec Jean-François Picard, 24 février 1987. Archives orales du CNRS. http://www.histcnrs.fr/archives-orales/schatzman.html.

Vigier, François. Correpondance personnelle avec l'auteur, 19 mars 2015.

Vigier, Jean-Pierre. Entretien avec Michel Pinault, 13 janvier 1998. BnF, Fonds Joliot-Curie, Musée Curie, Paris.

Sigles et abréviations

Glossaire

BKW Brillouin-Kramers-Wentzel

CEA Commissariat à l'énergie atomique

CERM Centre d'études et de recherches marxistes

CERN Conseil européen pour la recherche nucléaire

CIO Congrès des organisations industrielles

CNPQ Conselho Nacional de Pesquisa

CNRS Centre national de la recherche scientifique

CPUSA Parti communiste des États-Unis d'Amérique

CVIA Comité de vigilance des intellectuels antifascistes

ENS École normale supérieure

EPR Einstein-Podolsky-Rosen

FAECT Fédération des Architectes, Ingénieurs, Chimistes et Techniciens

FLN Front de libération nationale

FMTS Fédération Mondiale des Travailleurs Scientifiques

FTP Francs-tireurs et partisans

GRU Direction générale des renseignements de l'État-Major des forces armées

HUAC House Un-American Activities Committee

IAS Institute for Advanced Study

ICMQ interprétation causale de la mécanique quantique

IHP Institut Henri Poincaré

ISMQ interprétation standard de la mécanique quantique

JCR Jeunesse communiste révolutionnaire

MI6 Military Intelligence, section 6

MIT Massachusetts Institute of Technology

PCF Parti Communiste Français

PCUS Parti communiste de l'Union soviétique

PS Synchrotron à protons

QCD chromodynamique quantique

QED électrodynamique quantique

SNESRS-FEN Syndicat National de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique-Fédération de l'Éducation nationale

SSK Sociology of scientific knowledge

STO Service de Travail Obligatoire

TQC Théorie Quantique des Champs

UEC Union des étudiants communistes

UNEF Union nationale des étudiants de France

URSS Union des républiques socialistes soviétiques

USP Université de São Paulo

Titres courts des journaux et revues

Ann. IHP	*Annales de l'Institut Henri Poincaré.*
Ann. IHP A	*Annales de l'Institut Henri Poincaré, section A.*
CRAS	*Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences.*
Found. Phys.	*Foundations of Physics.*
Hist. Sci.	*Historia scientiarum.*
Hist. Stud. Nat. Sci.	*Historical Studies in the Physical and Biological Sciences.*
ISPS	*International Studies in the Philosophy of Science.*
JETP	*Journal of Experimental and Theoretical Physics.*
JPR	*Journal de Physique et le Radium.*
Living Rev. Relativ.	*Living Reviews in Relativity.*
NC	*La Nouvelle Critique.*
Phys. Let.	*Physics Letters.*
Phys. Let. A	*Physics Letters A.*
Phys. Rev.	*Physical Review.*
Phys. Rev. Lett.	*Physical Review Letters.*
Proc. Phys. Soc.	*Proceedings of the Physical Society.*
Proc. Phys.-Math. Soc. Jap.	*Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan.*
Proc. R. Soc. A	*Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences.*
PTP	*Progress of Theoretical Physics.*
PTP Suppl.	*Progress of Theoretical Physics Supplement.*
Rev. Mod. Phys.	*Reviews of Modern Physics.*
SLDB	*Séminaire de Théories Physiques dirigé par Mr Louis de Broglie.*
Stud. Hist. Philos. Sci. A	*Studies in History and Philosophy of Science Part A.*
Stud. Hist. Philos. Sci. B	*Studies in History and Philosophy of Science Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics.*

Index

Aharonov, Yakir, 188
Alain, 239
Alexandrov, Georgy Fedorovich, 259
Anderson, Carl D., 193
Andrade e Silva, João, 84, 113
Aspect, Alain, 2
Aubel, Eugène, 165
Auger, Pierre, 73
Azcárate, Manolo, 72
Azcárate, Pablo, 72

Barbieri, G., 233
Baudelaire, Charles, 135
Bauer, Edmond, 78
Becquerel, Henri, 15
Bell, John Stuart, 2, 3, 42, 299
Bergmann, Peter Gabriel, 119
Bernal, John Desmond, 133
Bernard, Peters, 45
Bernstein, Herbert J., 188
Bethe, Hans, 92, 201
Billoux, François, 262
Blackett, Patrick, 67
Blokhintzev, Dimitri I., 47, 69, 70, 153, 171, 260, 265, 271, 273, 276, 288, 292
Bohm, David, 3–5, 9–11, 13, 25, 32, 41–45, 49, 54–57, 59–69, 71, 74–76, 78–84, 87, 88, 92, 95, 100, 101, 107–109, 115, 119, 120, 126, 127, 129–132, 136–140, 142, 144, 148, 149, 151–153, 155–161, 164, 172, 174–179, 181, 183, 185–191, 194–196, 203–208, 211, 213, 215, 219, 221, 222, 224, 225, 227, 229, 232, 234, 235, 245, 261, 270–272, 275, 284, 287, 288, 291, 294, 298–300, 302, 303
  HUAC, 45, 46
  effet Aharonov-Bohm, 302
  milieu subquantique, 161–163, 168, 170, 175
  physique des plasmas, 161, 162
  potentiel quantique, 31, 50
  théorie de la mesure, 51–54
  théorie des métaux, 162
  théorie des niveaux, 164–167
  variables cachées, 46–51
Bohr, Niels, 1, 46, 55, 69, 70, 93, 108, 171, 240–242, 244–247, 249, 256, 269–272, 279, 290
  atome, 16, 22, 233
  complémentarité, 33–37, 40, 48, 69, 82, 298
  dialectique, 69
  débat Bohr-Einstein, 32, 38, 98, 254, 255
  fentes d'Young, 99
  institut, 32, 46
  objectivité, 95
  principe de correspondance, 167, 226, 227
  quantification, 90, 188, 190
Boltzmann, Ludwig
  constante, 170, 175

distribution de Maxwell-Boltzmann, 22
théorème H, 154
Bopp, Friedrich Arnold (Fritz), 154, 174
Born, Max, 23, 32, 79, 289
règle, 10, 31, 38, 54, 120, 132, 137, 140, 151–153, 155, 157, 159, 160, 164, 176, 178, 222, 300
Boukharine, Nikolaï, 233
Bragg, William Lawrence, 38
Braithwaite, Richard Bevan, 173
Brillouin, Léon, 14, 16, 38, 39, 41, 246
Brillouin, Marcel, 15
Bronshtein, Matvei Petrovich, 69
Bush, Vannevar, 43
Büchner, Georg, 238

Canguilhem, Georges, 6–8
Cartan, Élie, 23
spineur, 177
Casanova, Laurent, 261, 262, 296, 297
Caspary, Peter-Curt, 71
Caspary, Tamara, 71–73
Vita, 72
Cassavilas, D., 63
Cauchy, Augustin Louis
tenseur des contraintes, 142
Chadwick, James, 117, 197
Charney, Jule Gregory, 63, 64
Chew, Geoffrey, 202
Cogniot, Georges, 12, 69, 240, 261, 274
Cohen, Marcel, 240
Compton, Arthur
diffusion, 35
Compton, Arthur H., 38, 43
diffusion, 243
Condon, Edward, 45
Costa de Beauregard, Olivier, 41, 82
Cotton, Aimé, 15
Cotton, Eugène, 63, 273, 274, 287, 288
Cournot, Antoine-Augustin, 268

Daix, Pierre, 262
Darmois, Georges, 87, 116, 117, 120
Darrow, Karl K., 44
Dassault, Paul, 73
Dautry, Raul, 73
Dauvillier, Alexandre, 14, 15
Davisson, Clinton, 24
expérience de Davisson-Germer, 24, 98
Dayton, Bruce, 45
de Broglie, Louis, 1, 3, 4, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 22–25, 32, 34, 37, 40, 41, 48–52, 54, 57, 59–62, 65, 67, 68, 74–85, 87–89, 95, 97, 100–102, 105, 106, 108, 116, 118, 119, 123, 124, 126, 127, 129–132, 140, 144, 145, 149, 156, 157, 159, 173, 175, 194, 195, 204, 206–208, 210, 214, 219, 224, 225, 227, 229–232, 234, 235, 240, 242, 245, 246, 269–275, 282, 287–291, 293–295, 299, 300
Conseil Solvay, 37–39
double solution, 26, 27, 29–32
espace de configuration, 109–111, 113–115
onde de phase, 17–19
relation, 19, 21, 22, 35, 36
équation de guidage, 28
de Broglie, Maurice, 14, 15
de Fermat, Pierre
principe, 17, 19, 22, 25, 29
de Gaulle, Charles, 73
de Lattre de Tassigny, Jean, 72
de Maupertuis, Pierre Louis Moreau
principe de moindre action, 17, 19, 21, 22, 25, 29, 188

Debye, Peter
longueur, 162
Demkov, Youri N., 283–287
Depaquit, Serge, 195, 233
Desanti, Jean-Toussaint, 273, 276, 294
Dewdney, Christopher, 178, 189, 192
DeWitt, Bryce, 292
Dirac, Paul, 23, 27, 32, 76, 92, 93, 148, 241, 283
matrices, 193
nouvelle théorie de l'électron, 92, 147, 148, 196
quantification canonique, 226, 227
spineur, 217
équation, 27, 74, 76, 92, 105–107, 118, 130, 137, 177, 179, 193, 194, 208, 228, 247
spineur, 217
éther, 162, 163, 245
Doppler, Christian
effet, 243
Dufay, Jean, 64
Dupuy, Françoise, 71
Dyson, Freeman, 76, 92
Démocrite, 232
Dübendorfer, Rachel, 72, 73
Sissy, 71
Dürr, Detlef, 160

Eddington, Arthur, 135, 241, 260
Ehrenfest, Paul, 231
théorème, 167
Einstein, Albert, 1, 23, 37, 38, 45, 46, 48, 55, 56, 62, 65, 69, 76, 89, 94, 117, 245, 271, 274, 294
constante, 117
effet photo-électrique, 16
interprétation de la mécanique quantique, 240–242
relation de Planck-Einstein, 17, 18, 35, 36
statistiques de Bose-Einstein, 22, 23
théorie d'Einstein-Schrödinger, 74
théorie des gaz, 23
théorie unitaire, 116, 117
équation, 117, 118
équation de Smoluchowski-Einstein, 170
Elsasser, Walter M., 23, 24
Engels, Friedrich, 65, 238, 257, 267, 268, 274, 280, 285, 287, 291
Everett, Hugh, 3, 292

Fabry, Charles, 15
Faraday, Michael, 95
Febvre, Lucien, 240
Fer, Francis, 84, 88, 100, 108, 122, 263, 264, 277–281, 294, 300
Fermi, Enrico, 39, 54, 197, 200
Ferro-Luzzi, Massimiliano, 221
Feshbach, Herman, 44
Feyerabend, Paul, 168, 171, 174, 229
Feynman, Richard, 42, 44, 56, 76, 92, 98, 289
intégrale de chemin, 137
Fierz, Markus, 85, 168, 172, 174
Filippi, Ulysse, 266
Flato, Moshé, 223
Fock, Vladimir A., 27, 69, 70, 140, 241, 260, 271, 275, 276, 283, 286, 288, 290, 292, 303
Foote, Alexander, 73
Forner, Alain, 297
Fourier, Joseph
transformation, 35, 36, 108, 248, 249, 284
Fox, I. David, 45
Franck, James

Expérience de Franck-Hertz, 23, 126
Franco, Francisco, 72
Freistadt, Hans, 159
French, Bruce, 92
Frenkel, Yakov, 69, 203, 247, 271
Fresnel, Augustin
optique, 16, 21
Friedmann, Max, 45
Furry, Wendell, 45
Février, Paulette, 82, 248
Fürth, Reinhold, 170

Galilée, 98, 253
Gamba, A., 200
Garaudy, Roger, 263, 287, 291, 296, 297
Gell-Mann, Murray, 198, 200–202, 214, 221, 223, 299
formule, 196, 198, 213, 233
voie octuple, 199
Germer, Lester, 24
Giáp, Võ Nguyên, 300
Glashow, Sheldon, 201
Goldstein, Louis, 16
Goldstein, Sheldon, 160
Goto, Tetsuo, 224
Goudsmit, Samuel, 177, 189
Grommer, Jakob, 116, 117
Gross, David, 202
Gross, Eugene P., 161
Groves, Leslie, 43

Halbwachs, Francis, 84, 102–104, 124, 125, 195, 205, 207, 208, 210, 217, 224, 232, 233, 265, 266, 268, 269, 273, 282, 283, 285, 294, 297
Haldane, John Burdon Sanderson, 301
Hara, Osamu, 224
Hegel, Georg Wilhelm Friedrich, 66, 140, 296
Heisenberg, Werner, 1, 32, 33, 38, 218, 231, 241, 246, 269–271, 276, 279
isospin, 198
matrice S, 202
microscope, 36, 99, 243, 244
mécanique des matrices, 35, 36, 38, 137, 188
principe d'indétermination, 32–36, 47, 48, 53, 54, 60, 90, 93, 99, 153, 154, 170, 201, 242, 244, 247, 249, 255, 267, 269, 278, 285
Hermann, Grete, 42
Hessen, Boris, 7, 8
Hilbert, David
espace, 248
Hiley, Basil, 160
Hillion, Pierre, 84, 195, 210, 211, 213
Hume, David, 164
Huyghens, Christian, 21, 230
Hyppolite, Jean, 296

Jauch, Josef-Maria, 48
Jdanov, Andreï, 70, 259, 260, 262, 265, 292–294
jdanovisme, 258, 261, 286
Joliot-Curie, Frédéric, 63, 64, 72–74, 240, 264, 266, 290, 295, 301
Joliot-Curie, Irène, 73
Jordan, Pascual, 1, 32, 241, 252, 254, 294
Joyeux, Jean, 265, 281, 282, 284, 287, 293

Kahane, Ernest, 264
Kaluza, Theodor, 27, 74
Kant, Emmanuel, 164
kantisme, 70, 260
Katayama, Yasuhisa, 216
Kepler, Johannes, 278
Khrouchtchev, Nikita, 258, 286
rapport, 194
Kleman, Maurice, 195, 210

Kobayashi, Makoto, 223
Kramers, Hendrik Anthony (Hans), 38–40, 90–92
Krivine, Alain, 300
Kroll, Norman, 42
Kugelmann, Ludwig, 285
Kunsman, Charles, 24

Laberenne, Paul, 240, 271, 290
Lamb, Willis, 42, 44, 92
Landau, Lev, 69, 143, 144, 246
Langevin, Hélène, 246
Langevin, Paul, 11, 14, 23, 70, 97, 237, 239–247, 249, 251, 252, 256, 257, 266, 268, 276, 279, 285, 291
Larmor, Joseph
  précession, 185
Le Bellac, Michel, 297
Lederman, Leon, 197
Leduc, Victor, 262–264
Lefebvre, Henri, 280
Leibniz, Gottfried Wilhelm
  principe de continuité, 33
Leprince-Ringuet, Louis, 78
Lichnerowicz, André, 74, 87, 120
Lippmann, Gabriel, 15
Lochak, Georges, 14, 82, 84, 96, 125, 194, 283, 286, 287, 299
Lomanitz, Giovanni Rossi, 45
Lorentz, Hendrik Antoon, 37, 38
  facteur, 18
  groupe, 193
  théorie de l'électron, 90, 91, 95, 204
  transformations, 18, 145, 146, 193, 205
Lurçat, François, 97, 265, 275–278, 280–282, 287, 288, 290, 291, 293, 297
Lyssenko, Trofim, 260, 262, 287, 288
  lyssenkisme, 239, 262, 277

Lénine, Vladimir I., 64, 66–68, 164, 165, 167, 233, 238, 257, 267, 269, 276, 277, 280, 281, 289, 294, 298
Lévy-Leblond, Jean-Marc, 297, 298

Mach, Ernst, 64
Madelung, Erwin, 9, 129–132, 141, 156
  équation, 130, 141–144, 155, 160, 161, 185, 231
Maki, Kazumi, 200
Maksimov, Alexander A., 260
Markov, Moisey, 69, 260
  processus, 155, 158, 171
Marshak, Robert, 44, 200
Marshall, George
  plan, 259
Marx, Karl, 65, 66, 68, 233, 238, 257, 267, 268, 280, 285, 298
  marxisme, 65–67, 74, 78, 127, 133, 172, 194, 233, 238, 239, 257, 259, 267, 268, 273, 277, 279–283, 288, 292, 293, 297, 298
Maskawa, Toshihide, 223
Mathisson, Myron, 203, 204
Mauguin, Jean, 23
Maxwell, James Clerk, 95, 122, 244
  tenseur, 146
  équations, 94, 147
Mollet, Guy, 283, 296
Morand, Max, 63
Morette, Cécile, 223
Morrison, Philip, 45
Møller, Christian, 203, 207

Nakagawa, Masami, 200
Nakano, Tadao, 198
  rotateur, 178, 209, 234
Ne'eman, Yuval, 214, 221
Nelson, Edward, 154, 160

Newton, Isaac, 7, 8, 83, 98, 117, 122, 230, 231
seconde loi, 93
Nordström, Gunnar, 74

Ohnuki, Yoshio, 200
Okubo, Susumu, 200
Omel'ianovskii, Mikhail Erazmovich, 260
Oppenheimer, J. Robert, 43–46, 55, 56, 92
Orcel, Jean, 166, 291, 296

Pais, Abraham, 44, 90, 202
Pannekoek, Anton, 67
Pascal, Blaise, 167
Pauli, Wolfgang, 1, 27, 32, 48, 54, 55, 59, 62, 78, 85, 246, 247
matrices, 179
objection contre l'onde pilote, 38, 39, 54, 60, 76, 107, 126
objection contre le postulat d'équilibre, 152
vecteur, 179
équation, 130, 177–180, 183–185, 189, 191, 193, 203, 206, 209, 225, 227, 234
Pauling, Linus, 32
Perrin, Francis, 73, 74, 78, 246, 269
Perrin, Jean, 23, 240
Petiau, Gérard, 41, 84, 88
Pierce, Charles Sanders, 233
Planck, Max
constante, 17, 34, 50, 170, 226
relation de Planck-Einstein, 17, 18, 22
Poincaré, Henri, 15, 91, 268
Politzer, Geoges, 246
Politzer, Hugh David, 202
Popper, Karl, 168, 171
poppérien, 48
Pouchkine, Alexandre, 135
Powell, Cecil Frank, 168
Prenant, Marcel, 240, 262
Proca, Alexandru, 16, 82, 246
équation, 74
Pál, Gombás, 67

Rabi, Isaac, 32
Ramsauer, Carl
effet, 24
Rauch, Helmut, 188
Rauscher, Elizabeth, 303
Reid, Alexander, 24
Retherford, Robert, 92
Rivet, Paul, 239
Robrieux, Philippe, 296, 297
Rockefeller, John, Davison
bourse de la Fondation, 246
Rosenfeld, Léon, 55, 67–69, 78, 82, 140, 168, 171–175, 229, 241, 246, 247, 292, 293, 295
Russel, Bertrand
tribunal, 300
Rutherford, Ernest, 117
Régnier, André, 60, 62, 63, 65, 66, 76, 79, 112, 154
Röntgen, Wilhelm, 278

Sakata, Soichi, 129, 133, 134, 195, 198, 200, 201, 219, 292
Sakaton, 200, 217
Salam, Abdus, 201
Sartre, Jean-Paul, 296
Schatzman, Benjamin, 63
Schatzman, Évry, 9, 11, 47, 59–68, 70, 71, 74, 76, 78–81, 87, 154, 155, 159, 161, 164, 165, 229, 258, 265, 270, 271, 273, 295, 300, 302
Schiller, Ralph, 10, 50, 119, 177–179, 181, 183, 185, 187–189, 206, 225

Schrödinger, Erwin, 1, 24, 25, 27, 29, 37, 38, 55, 56, 74, 108, 114, 131
chat, 2, 37, 42, 51, 98
Zitterbewegung, 124, 208
équation, 25–27, 31, 49–52, 105, 107–110, 112, 113, 115, 130, 137, 142, 144, 154, 155, 164, 177, 183, 185
Schwarzschild, Karl
singularité, 118
Schwinger, Julian, 42, 44, 76, 92
Schönberg, Mário, 139, 140, 144, 151, 152, 155, 156, 183, 292
Selleri, Franco, 303
Sellier, Émile, 63
Sobolov, Sergueï Lvovitch, 277
Solomon, Jacques, 11, 12, 16, 42, 97, 237, 239, 245–257, 268, 294
Sommerfeld, Arnold, 16
Spengler, Oswald, 132
Staline Joseph, 259
Staline, Joseph, 194, 258, 259, 262, 268, 274
Suslov, Mikhail, 259
Susskind, Leonard, 188
Svechnikov, Gennadii A., 273
Süßmann, Georg, 48

Takabayasi, Takehiko, 4, 9, 10, 12, 88, 105, 129, 130, 132, 133, 135–138, 140–149, 151, 152, 156, 178, 179, 183, 193–195, 209, 211, 215, 216, 224, 225, 227–231, 235, 302, 303
Taketani, Mitsuo, 133, 134, 219, 292
Tamm, Igor, 69
Teissier, Georges, 262
Terletski, Jakow P., 47, 70, 153, 171, 260, 265, 271, 281, 288–290, 292, 303
Thibaud, Jean, 15
Thiounn, Mumm, 84
Thomson, George Paget, 24
Thomson, Joseph John, 91
Thorez, Maurice, 296
Tillon, Charles, 72
Tiomno, Jayme, 10, 46, 50, 177–179, 181, 183, 185, 189, 206, 225
Tolstoï, Léon, 238
Tomonaga, Sin-Itiro, 76, 92, 129, 134, 135
Tonnelat, Marie-Antoinette, 41, 74, 79, 81–83, 87, 120
Truman, Harry S., 259

Uhlenbeck, George, 44, 134, 177, 189

Valentini, Antony, 160
Valery, Paul, 135
van Winter, Clasine, 212, 213, 234
Vassails, Gérard, 262, 266–269, 271–274, 278, 285, 289, 295
Vavilov, Nikolai, 267
Vavilov, Sergey, 266, 267, 269
effet Vavilov-Tcherenkov, 267
Veneziano, Gabriele, 224
Vigier, Corinne, 72
Vigier, Henri, 71, 72
Vigier, Jean-Pierre, 3, 4, 8–11, 51, 57, 60, 62, 63, 65, 66, 68–82, 84, 85, 129, 137, 140, 142, 144, 149, 168, 169, 175, 176, 178, 194, 215, 225, 229, 230, 232–235, 237, 241, 245, 261, 265, 271–273, 275–280, 282, 287–289, 299, 300, 302, 303
PCF, 263, 265, 274, 275, 289–291, 294–298
URSS, 283, 284
Braut, 72
gouttelette Bohm-Vigier, 203–211

modèle Bohm-Vigier, 151–161
modèle des particules, 195–196, 213, 215–224
premiers travaux, 87–120
probabilités, 171–175
style, 120–128
théorie des niveaux d'organisation, 164–168
Vigier, Maya, 72
Vigneron, Léopold, 63
Vogt, Karl, 238
von Goethe, Johann Wolfgang, 135
von Kármán, Theodore, 78
von Neumann, John, 47, 48, 80, 267–269
Théorème d'incomplétude, 40–42, 47, 59, 76, 247, 248

Waller, Ivar, 201
Wallon, Henri, 240
Wavre, Rolin, 71
Weinberg, Joseph, 43, 45, 201
Weisskopf, Victor, 44, 92
Weissmann, George, 303
Wheeler, Archibald, 202
Whitaker, Andrew, 12, 248, 251
Wigner, Eugène P., 48, 231
distribution, 148
Wilcek, Frank, 202
Wolff, Christian, 267

Yang, Chen Ning, 200
Yevick, Miriam, 55
Young, Thomas
fentes, 83, 97, 99, 100, 106, 123
Yukawa, Hideki, 10, 129, 134, 195, 201, 209, 215, 216, 218, 219, 221, 223, 230, 235, 303
maru, 134
champ mésique, 201, 202
Yukawon, 217, 235

Zanghí, Nino, 160
Zweig, George, 200, 221, 223, 299

Table des matières

Résumé **vii**

Remerciements **ix**

Introduction **1**

1 Aux origines de l'interprétation causale de la mécanique quantique **13**
1.1 Les théories de l'onde pilote et de la double solution de Louis de Broglie 13
1.1.1 Louis de Broglie, un physicien au profil atypique 14
1.1.2 L'hypothèse des ondes de matière 16
1.1.3 La réception et la diffusion des travaux de Louis de Broglie . 23
1.1.4 Les théories de la double solution et de l'onde pilote 26
1.1.5 Un réalisme aux antipodes de la complémentarité de Bohr . 32
1.1.6 La réception négative de la théorie de l'onde pilote au ve Conseil Solvay et les raisons d'un abandon 37
1.2 Les variables cachées de David Bohm et le renouveau du débat quantique après la Seconde Guerre mondiale 41
1.2.1 David Bohm, un physicien dans la tourmente 42
1.2.2 La théorie des variables cachées 46
1.2.3 La conspiration du silence 55

2 La réception inattendue de la théorie de Bohm en France **59**
2.1 L'épineux problème de Broglie 60
2.2 La jeunesse, flamme de la révolution 63
2.2.1 Évry Schatzman, premier ambassadeur en France de l'interprétation causale 63
2.2.2 Jean-Pierre Vigier, militant-physicien 71
2.3 Le ralliement de Louis de Broglie à l'interprétation causale 75
2.3.1 L'homme stupide est celui qui ne change pas 75
2.3.2 Un ennemi de classe, mais allié de circonstance 78
2.4 La constitution du « groupe IHP» 81

3 Les premiers travaux de Jean-Pierre Vigier sur l'interprétation causale 87
3.1 L'idéal classique et relativiste 88
3.1.1 La crise de la physique quantique comme une conséquence de ses orientations épistémologiques 90
3.1.2 Le réalisme comme critère épistémologique 93
3.2 L'onde à singularité et la structure étendue des particules 97
3.2.1 L'unité onde-corpuscule à travers l'expérience des fentes d'Young 97
3.2.2 Les équations non linéaires comme justification du théorème de guidage de Louis de Broglie 101
3.3 Retour sur la description des systèmes à N corps dans l'espace réel . . 109
3.3.1 Les conditions de de Broglie 109
3.3.2 La justification de l'utilisation de l'espace de configuration dans la théorie causale 112
3.3.3 Contre la non-localité 114
3.4 L'interprétation causale et la relativité générale 116
3.4.1 Une tentative d'unification de la gravitation et des quanta . . 116
3.4.2 Un abandon prématuré des travaux de Vigier en relativité . . 119
3.5 Jean-Pierre Vigier, un style scientifique héritier de Louis de Broglie . 120
3.5.1 Un physicien philosophe 121
3.5.2 Un physicien à images 123
3.5.3 Un physicien rationaliste 125
3.5.4 L'héritage de Louis de Broglie 127

4 La représentation hydrodynamique de la mécanique quantique 129
4.1 La représentation hydrodynamique de la mécanique quantique par Erwin Madelung 130
4.2 Takehiko Takabayasi : physicien, historien des sciences et poète . . . 133
4.2.1 L'interprétation de la mécanique quantique selon Takehiko Takabayasi 136
4.3 La représentation hydrodynamique selon Takehiko Takabayasi 141
4.3.1 Le potentiel quantique comme potentiel de pression 141
4.3.2 la représentation hydrodynamique en présence d'un potentiel électromagnétique 142
4.3.3 La quantification du fluide de Madelung 143
4.3.4 La représentation hydrodynamique de l'équation de Klein-Gordon 144
4.3.5 La représentation hydrodynamique et la « nouvelle » théorie classique de l'électron de Dirac 147

4.3.6 Les travaux ultérieurs de Takabayasi sur la représentation hydrodynamique 148

5 Le modèle Bohm-Vigier et la théorie des niveaux d'organisation de la nature 151

5.1 La démonstration de la règle de Born dans le cadre de l'ICMQ 152

5.1.1 Le besoin d'une démonstration de la règle de Born et les premières tentatives 152

5.1.2 La démonstration de 1953 par les fluctuations de la fonction d'onde 155

5.1.3 Un problème toujours ouvert 159

5.2 Le milieu subquantique et la théorie des niveaux d'organisation de la nature 160

5.2.1 L'origine du milieu subquantique chez Bohm 160

5.2.2 Du milieu subquantique à la théorie des niveaux d'organisation de la nature 162

5.2.3 La rupture épistémologique de Vigier 164

5.2.4 Le 9e Symposium de la Colston Research Society 168

5.2.5 L'heuristique du milieu subquantique : la thermodynamique cachée des particules de de Broglie 175

5.2.6 Une parfaite collaboration 175

6 Les particules à spin dans l'interprétation causale 177

6.1 Le modèle par les angles d'Euler de Bohm, Tiomno et Schiller 179

6.1.1 La description des rotations par les angles d'Euler 181

6.1.2 Les équations du mouvement 183

6.1.3 La symétrie 4π et la signification des règles de quantification du moment angulaire 186

6.2 La théorie de la mesure appliquée au spin 189

6.3 Le passage à la relativité par la représentation hydrodynamique de l'équation de Dirac 193

7 Le programme oublié : le modèle unifié des particules 195

7.1 La physique des hautes énergies avant l'avènement du modèle des quarks 197

7.2 Le modèle unifié des particules du groupe IHP 203

7.2.1 Le modèle classique de la gouttelette Bohm-Vigier 203

7.2.2 La quantification de la théorie 211

7.2.3 La première classification des particules 214

7.2.4 La poursuite du programme au Japon et la nouvelle classification des particules 215
7.2.5 Un programme de recherche doublement ignoré 221
7.3 Retour sur la notion de classicisme dans l'ICMQ 225
7.3.1 Les significations de la quantification dans les interprétations standard et causale 225
7.3.2 Les fonctions de la représentation classique de la mécanique quantique 229
7.3.3 Le modèle des particules : entre rupture et continuité 233

8 Une controverse dans la controverse : le débat quantique au sein du PCF 237
8.1 L'interprétation de la mécanique quantique avant la Seconde Guerre mondiale 239
8.1.1 Paul Langevin, le nouveau déterminisme et l'humanisation de la science 239
8.1.2 Jacques Solomon, l'ambassadeur de la complémentarité en France 246
8.2 Le débat quantique dans le PCF de l'après-guerre 257
8.2.1 La lutte idéologique au sein du PCF 258
8.2.2 Le débat quantique au sein du PCF avant l'arrivée de l'interprétation causale (1946–1952) 265
8.3 L'accueil controversé de l'interprétation causale par les communistes . 270
8.3.1 Un accueil initial chaleureux 270
8.3.2 De Broglie devient une personnalité respectable pour les communistes 273
8.3.3 La polémique dans *la Nouvelle Critique* (1955–1958) 275
8.3.4 La réouverture du débat par *la Pensée* en 1960 290
8.3.5 La caractérisation du débat communiste : retour sur la thèse Jammer 292
8.3.6 Épilogue à la controverse : la critique du dogmatisme par Vigier 297

Conclusion 299

Annexes 305

A Archives 307
A.1 Correspondance 307
A.1.1 Évry Schatzman à Léon Rosenfeld (17 juin 1950) 308
A.1.2 David Bohm à Évry Schatzman (1951 - non datée) 309
A.1.3 Max Born à Jack Brimble (14 mars 1951) 311

A.1.4 Évry Schatzman à David Bohm (3 décembre 1951) 313
A.1.5 Évry Schatzman à David Bohm (20 février 1952) 315
A.1.6 Évry Schatzman à Léon Rosenfeld (30 mars 1952) 318
A.1.7 Léon Rosenfeld à Frédéric Joliot-Curie (6 avril 1952) 326
A.1.8 Léon Rosenfeld à Évry Schatzman (6 avril 1952) 327
A.1.9 Frédéric Joliot-Curie à Léon Rosenfeld (21 avril 1952) . . . 328
A.1.10 Évry Schatzman à Léon Rosenfeld (28 avril 1952) 329
A.1.11 Évry Schatzman à David Bohm (15 mai 1952) 330
A.1.12 Léon Rosenfeld à David Bohm (30 mai 1952) 332
A.1.13 David Bohm à Évry Schatzman (16 juin 1952) 333
A.1.14 Évry Schatzman à Gombás Pál (28 juillet 1952) 334
A.1.15 David Bohm à Évry Schatzman (7 septembre 1952) 335
A.1.16 Évry Schatzman à David Bohm (21 septembre 1952) 337
A.1.17 Gérard Vassails à Évry Schatzman (non datée 1952) 340
A.1.18 David Bohm à Évry Schatzman (9 octobre 1953) 342
A.1.19 Évry Schatzman et Jean-Pierre Vigier à David Bohm (13 octobre 1952) 343
A.1.20 David Bohm à Évry Schatzman (non datée 1952) 348
A.1.21 David Bohm à Évry Schatzman (12 octobre 1953) 354
A.1.22 David Bohm à Évry Schatzman (22 décembre 1953) 355
A.1.23 Madame la secrétaire de Frédéric Joliot-Curie à Jean-Pierre Vigier (7 janvier 1955) 357
A.1.24 Frédéric Joliot-Curie à G. Angerand (14 mars 1955) 357
A.1.25 Frédéric Joliot-Curie à Jean-Pierre Vigier (14 mars 1955) . . 358
A.1.26 Jean-Pierre Vigier à Vladimir A. Fock (30 juin 1955) 359
A.1.27 Vladimir A. Fock à Jean-Pierre Vigier (8 septembre 1959) . . 361
A.1.28 Jean-Pierre Vigier à David Bohm (17 mai 1962) 362
A.1.29 Jean-Pierre Vigier à David Bohm (non datée 1962) 364
A.1.30 Évry Schatzman à Georges Cogniot, non datée 365
A.2 Documents 367
A.2.1 Procès-verbal, Moillesulaz, 18 avril 1942 367
A.2.2 Procès-verbal, Montpellier, 21 avril 1942 368
A.2.3 Interrogatoire de Jean-Pierre Vigier, Vichy, 21 avril 1942 . . 369
A.2.4 Procès-verbal, Vichy, 22 avril 1942 372
A.2.5 Procès-verbal, Vichy, 25 avril 1942 373
A.2.6 Procès-verbal, Vichy, 26 avril 1942 374

B Conventions d'écriture **377**
B.1 Vecteurs et tenseurs 377

B.1.1 Cas galiléen 377
B.1.2 Cas relativiste 378
B.2 Opérateurs de l'algèbre linéaire 379
B.2.1 Cas galiléen 379
B.2.2 Cas relativiste 380

C Démonstrations **381**
C.1 Démonstration de Vigier de la règle de Born 381
C.2 Paramètres de Cayley-Klein 385
C.3 Expression des projections S et S' et des opérateurs quantiques J et J' . 386

Bibliographie **389**

Sigles et abréviations **427**

Index **439**

Table des figures

1.1 Louis de Broglie au laboratoire de physique des rayons x, rue Lord-Byron à Paris . . . 15
1.2 Représentation de l'onde de phase de Louis de Broglie . . . 20
1.3 David Bohm à Shelter Island en 1947 . . . 44
1.4 Une du *Time Magazine* de juin 1954 . . . 56

2.1 Jean-Pierre et Tamara Vigier en 1942 . . . 73

3.1 Fentes d'Young : canon à électrons (Schémas de Feynman) . . . 99
3.2 L'expérience des fentes d'Young dans la représentation causale . . . 100
3.3 Thèse de Jean-Pierre Vigier : Fonction à singularité dans la théorie de la double solution . . . 102
3.4 Théorème de guidage, illustrations de Vigier (1954) et Halbwachs (1960) . . . 103
3.5 Thèse de Jean-Pierre Vigier : Trajectoires des particules sans interaction dans l'ICMQ . . . 107
3.6 Paquet d'onde. . . . 107
3.7 Thèse de Jean-Pierre Vigier : Illustration géométrique des conditions de Louis de Broglie . . . 111
3.8 Thèse de Jean-Pierre Vigier : Expérience de type EPR illustrant le « problème » de la non-localité. . . . 114
3.9 Thèse de Jean-Pierre Vigier : trajectoire des particules à spin . . . 124

4.1 Portrait du professeur Takehiko Takabayasi, non daté. . . . 135

5.1 Participants au 9e Symposium de la Colston Research Society de 1957. 169

6.1 Représentations des trois angles d'Euler θ, φ et ψ. . . . 182
6.2 Ruban de Möbius illustrant la symétrie 4π des spineurs . . . 187
6.3 L'expérience de Stern et Gerlach . . . 190
6.4 Simulation numérique des trajectoires des particules dans l'expérience de Stern et Gerlach selon l'ICMQ . . . 192

7.1 Classification des particules selon la voie octuple (*Eightfold Way*) de Gell-Mann 199
7.2 Déplacement relativiste d'une particule dotée d'un mouvement de rotation interne 205
7.3 Vecteurs giration et balourd (schéma de de Broglie) 209

8.1 Jacques Solomon : Diffraction des électrons par un trou percé dans un écran (1939) 254
8.2 Débat Bohr-Einstein : Dispositif de diffraction par un diaphragme suspendu à un ressort 255

Liste des tableaux

7.1 Première classification des particules du modèle Bohm-Vigier 215
7.2 Table des particules (incomplète) déduite du groupe $G = \mathrm{SO3}^+ \times \mathrm{SO3}^- \times \mathrm{SO3}'$ 220

8.1 Eftichios Bitsakis : Comparaison des interprétations de la MQ par Einstein, Bohr, et Langevin. 240