

La physique quantique Pour raison garder

S. DINER

Institut de Biologie Physico-Chimique
13, rue Pierre et Marie Curie, 75005 Paris

Ce colloque est un hommage à Louis de Broglie, tant au savant qui a découvert les “ondes de matière”, qu’à l’homme de raison qui a lutté toute sa vie pour maintenir une image réaliste du monde.

De Broglie partage avec Henri Poincaré une attitude foncièrement opposée à toutes les démarches “formalistes” dont le xxème siècle a été le théâtre. C’est ce qui les réunit, dans une marginalité relative, dont leur génie commence seulement à les faire sortir.

Ils sont tous les deux porteurs de messages qui bouleversent des images du monde établies sans doute depuis plusieurs millénaires. Poincaré découvre que le hasard n’est pas irrémédiablement opposé à la nécessité et à l’ordre. De Broglie impose l’idée révolutionnaire que les atomes et toutes les particules, comme l’électron ou le neutron, ne sont pas de simples boules, mais sont accompagnés, dans leur mouvement, de phénomènes qui ressemblent en tout point à ceux qui sont si caractéristiques des ondes. Comme si toute particule microscopique était accompagnée d’une musique secrète qui en ferait la richesse. Mais ils sont tous deux des visionnaires et non pas des anarchistes. Ils cherchent tous deux à canaliser les révolutions scientifiques pour constituer un front unitaire de la Science. L’essence même de leurs deux découvertes est de montrer que des catégories conceptuelles, relevant de ces oppositions binaires qui constituent la toile de fond sur laquelle se tissent toutes les représentations du monde, entretiennent pour ainsi dire des relations de parenté longtemps insoupçonnées.

Que le Hasard flirte avec le Déterminisme, que le Discontinu ne soit pas l’ennemi du Continu, voilà une nouvelle à première vue paradoxale, que la Science Contemporaine n’a pas fini de digérer. Digestion difficile dans un climat général de déconstruction de la réalité et d’irrationalisme

qui marque le XX^{ème} siècle. Tourmentes de la pensée dans un monde aux turbulences cruelles. En hommage à Louis de Broglie, ce Colloque s'est voulu une réunion de physiciens qui tiennent à Raison Garder.

Le XIX^{ème} siècle a vu s'affirmer deux programmes scientifiques:

- le programme mécaniste et atomistique, qui s'exprime à travers la chimie et la thermodynamique
- le programme des ondes et des champs, qui triomphe en optique, puis en électromagnétisme.

La victoire, après des millénaires, de la vision atomique du monde s'effectue en liaison étroite avec la théorie des phénomènes de hasard. Là où sont les atomes, bien souvent règne le hasard. Et c'est bien cela qui gênait Aristote, lui faisant refuser les atomes et le vide, parce qu'il récusait le désordre. Et c'est pourtant ce qui fait une grande part du génie d'Einstein, d'avoir systématiquement considéré que là où l'on observe des mouvements qui semblent dûs au hasard, là se trouvent des atomes. Derrière le mouvement brownien se cache la structure moléculaire de l'eau. Derrière les fluctuations du rayonnement d'un corps idéal, appelé "corps noir", se cachent des "atomes de lumière" : les photons.

Il s'est produit au XX^{ème} siècle un renouveau total de la Mécanique Classique, alors que l'on pouvait penser qu'il n'y'avait là plus rien de fondamental à découvrir. Grâce aux travaux de Poincaré, Lyapounov et Birkhoff, puis à ceux de l'école russe des systèmes dynamiques (Andronov, Kolmogorov, Anosov, Sinai, Arnold) on a vu se développer le nouveau paradigme du chaos déterministe. Les équations de la mécanique peuvent donner naissance à des mouvements parfaitement déterminés, mais si complexes, que leur représentation et leur prévision deviennent impossibles. Des mouvements qui ont tous les attributs du hasard. Et ce hasard est à nouveau fortement lié à l'atomisme, car bien des systèmes qui manifestent le chaos déterministe ont en fait des propriétés mathématiques analogues à celles d'un billard de boules dures. Hasard et chaos signifient instabilité, ce qui semble suggérer quelque part l'existence de discontinuités, donc de domaines isolés, bref d'"atomes".

Au début du siècle, l'ancienne théorie quantique semblait s'engager dans la même voie de l'atomisme: l'atomisme des échanges d'énergie entre la matière et la lumière. De son côté, la théorie des probabilités formalisée par Kolmogorov dans les années 30, était elle aussi profondément atomiste. Elle s'applique en effet à des événements complexes que l'on peut décomposer en événements simples, et calcule par des opérations

simples la probabilité de l'évènement composé à partir des probabilités des évènements composants.

Après des millénaires de prégnance philosophique, l'Atomisme s'impose comme vision scientifique du monde. En un sens le xxème siècle va exploiter dans toutes les directions cette vision simple, logique et fertile. Il y a là un principe d'explication universel qui s'applique aussi bien à la matière inanimée qu'à la matière vivante. La Biologie Moléculaire est l'expression contemporaine nouvelle de cet atomisme universel. Enfin trêve de parler des atomes sans les voir, puisqu'aujourd'hui les progrès de la technologie permettent d'accéder aux lieux secrets où ils se nichent. La microscopie électronique à haute résolution ou le microscope à effet tunnel nous fournissent depuis peu des images des atomes. Ils sont bien là, petites boules diffuses et tranquilles, comme on les imaginait.

Et pourtant, depuis la thèse de Louis de Broglie en 1924, se sont accumulées les évidences que les particules microphysiques, les atomes en particulier, ne sont pas de petites boules isolées dans le vide. Liées à ces particules et autour d'elles, s'agitent des phénomènes mystérieux qui étendent d'une manière universelle les phénomènes ondulatoires et continus introduits en optique et en électromagnétisme. Le vide, là où il n'y'aurait point de matière, n'est pas rien. Pour reprendre l'expression d'Emile Noël (1648), on parle à nouveau du Plein du Vide.

La théorie quantique dans toute son étendue prend acte de ce que les particules localisées ne sont pas seules dans l'Univers, mais baignent dans des "Champs", qui leur confèrent leurs propriétés particulières. La mécanique quantique rend admirablement compte de ces propriétés par un formalisme mathématique élégant et complexe, mais elle ne démêle en rien ce rapport mystérieux entre les particules et les champs. La mécanique quantique fait écho à l'existence de l'onde de de Broglie, sans renseigner pour autant sur la nature de cette onde. De là un des plus grands débats épistémologique et scientifique de ce temps. Le débat sur l'interprétation de la mécanique quantique.

Ce colloque, rassemblant treize conférenciers venant des domaines sensibles les plus variés de la physique quantique, et neuf jeunes chercheurs auxquels l'expérience donne déjà une mentalité critique nouvelle, a cherché à poser les repères de la situation actuelle de ce débat fondamental.

Au cours du colloque les grandes questions suivantes ont été débattues:

1) si le monde est quantique à l'échelle microscopique, comment peut-on expliquer son aspect ordinaire à notre échelle? L.E. Ballentine (Canada) a montré que cette question n'a pour l'instant pas de réponse définitive.

2) l'univers microphysique est un univers turbulent où le hasard rôde sans cesse. Il faut créer un calcul des probabilités quantique (s), pour décrire convenablement cet aléatoire primordial. C'est le but poursuivi par L.Accardi (Italie). S.Albeverio (Allemagne) a montré les rapports complexes et par trop formels que ce calcul entretient avec le calcul classique des probabilités.

3) à ces difficultés de base, s'ajoute l'incapacité de la théorie quantique à décrire un système de plusieurs particules en spécifiant leur comportement dans l'espace physique ordinaire. Elle doit avoir recours à un espace mathématique abstrait dont la dimension croît avec le nombre de particules. Le réalisme de Louis de Broglie l'empêchait de considérer cette situation comme physiquement satisfaisante. Les expériences récentes d'interférence atomique, exposées au cours de la réunion, par J. Robert, rendent cette situation encore plus irritante. C'est la comparaison des "calculs" dans cet espace abstrait et des images réalistes de l'espace ordinaire qui entraîne bien des paradoxes que la communauté scientifique digère mal et que la communauté philosophique agite à tort et à travers. D'autant plus que l'expérience donne raison aux "résultats" des calculs dans l'espace abstrait, pourvu que l'on sache les rendre pertinents pour l'expérience dans l'espace ordinaire. A. Zeilinger (Autriche) expose la dernière mise en forme – dont il est l'auteur – de cette discussion née avec Einstein, Podolsky et Rosen en 1935, et marquée depuis par les fameuses inégalités de Bell et les expériences d'Aspect.

4) à ces difficultés qui peuvent paraître techniques s'ajoute une difficulté plus fondamentale sans doute et dont toutes les autres dérivent peut-être. La mécanique quantique pose le problème de savoir si dans l'univers microphysique les propriétés et les qualités des objets sont explicites ou ne se révèlent qu'à l'observation. Débat séculaire des qualités cachées, en faveur desquelles penche la mécanique quantique, sans arriver à formuler une véritable théorie de l'observation et de la mesure, dans un cadre tenant compte de la perturbation du système liée à son observation.

P. Pearle (U.S.A.) et Y. Vorontsov (Russie) ont exposé certaines des vues les plus avancées sur la théorie de la mesure en mécanique quantique. Vorontsov, en particulier, a montré selon quels principes on

peut effectuer des mesures quantiques non-perturbantes. Principes dont il est l'un des initiateurs, et qui trouvent aujourd'hui de nombreuses applications en optique quantique.

La problématique de la théorie de la mesure porte en elle les enjeux les plus fondamentaux de la théorie quantique et sans doute de toute théorie physique. Elle pose la question essentielle de la nature de la réalité. Toute Physique se renvoie sans cesse à la Métaphysique. La Mécanique Quantique, comme la Théorie des Probabilités, est une théorie de la Puissance, au sens de la *Potentia* aristotélicienne. Elle appartient à la Physique de la Puissance où règnent les mathématiques et certains de leurs paradigmes dominants, comme le calcul vectoriel (algèbre linéaire), le calcul intégral et la théorie de la mesure mathématique, le calcul variationnel. Toutes doctrines où les ensembles d'objets et les combinaisons d'objets jouent un rôle fondamental. Les problèmes que rencontre la mécanique quantique proviennent de ce que l'on voudrait lui faire rendre compte d'une Physique de l'Acte, physique de l'irréversibilité, concrétisée par l'existence de l'objet individuel. L'interprétation dite de "Copenhague" de la Mécanique Quantique, dûe à Bohr et Heisenberg, voulait effectivement y voir un discours sur l'objet individuel. A cette interprétation, s'oppose celle d'Einstein, Popper et Blokhintsev dont L.E. Ballentine s'est fait depuis 1970 le champion incontesté. Interprétation statistique qui déclare que les énoncés de la mécanique quantique concernent des ensembles d'objets préparés dans des conditions identiques, mais dont les comportements sont différents par suite du hasard inhérent à la microphysique. Dans son exposé aux Treilles, comme dans les discussions, L.E. Ballentine a souligné les points forts de cette interprétation, qui élimine bien des "paradoxes". Mais cette problématique a évolué au cours de la dernière décennie. la théorie de la mesure est en effet passée du stade philosophico-mathématique au stade de l'expérimentation physique et de là au stade technologique. Ceci est essentiellement dû aux prouesses technologiques qui permettent maintenant de manipuler et d'observer, un seul "photon", un seul électron, un seul atome. L'objet unique dans toute sa splendeur. On accède ainsi à des domaines où la théorie quantique de la mesure peut être testée expérimentalement et où le problème de la mesure quantique prend une réelle valeur physique et technologique. L'optique quantique et ses expériences élaborées d'interférométrie, l'interférométrie électronique (exposé de H. Lichte – Allemagne), l'interférométrie atomique (exposé de J.Robert – jeune participant français), l'interférométrie neutronique dont A. Zeilinger est un des pionniers, les états comprimés

de la lumière, les pièges atomiques, la détection des ondes gravitationnelles (motivation des travaux de l'école de Moscou de V. Braginski à laquelle appartient Y. Vorontsov) et les effets quantiques mésoscopiques et macroscopiques (exposés de A. Leggett – U.S.A. – et H. Dekker – Pays-Bas), voilà autant de domaines ultra-récents où la théorie quantique s'éprouve et est mise au défi.

La Mécanique Quantique est un peu comme une grande maison qui nous aurait été léguée par nos grands parents. Toute notre activité tend à l'aménager au mieux pour y loger de nouveaux venus (nouveaux faits expérimentaux) et de tenter de comprendre l'esprit qui y règne. Les physiciens en général sortent peu de la maison pour essayer d'apercevoir sa situation, pour tenter de voir les maisons avoisinantes. Certains cependant se risquent à vouloir bâtir dans le parc une autre maison si ce ne sont des dépendances. C'est ce que l'on nomme des "théories alternatives à la mécanique quantique". Mais ce sont là pour le moment des constructions sommaires et peu convaincantes. Cet aspect du paysage, auquel Louis de Broglie était attaché, n'a pas été beaucoup évoqué au cours de ce colloque, quoique son existence ait été parfaitement signalée dans le très beau document spécialement préparé pour cette réunion par un des jeunes participants – S. Sonogo – italien travaillant à Bruxelles. Il a dressé une véritable carte des problèmes conceptuels de la théorie quantique, balisant près de 500 "villages, hameaux, cloîtres et chapelles". Un tel survol critique et classificatoire du paysage quantique le plus récent n'existe pas dans les publications des dernières années. Ce document, distribué aux participants, a servi de base aux discussions et se trouve reproduit à la suite : "Conceptual foundations of quantum theory : a map of the land".

Le succès de la réunion des Treilles vient de ce que le choix des participants et le mot d'ordre "Pour Raison Garder" ont permis d'éviter les discussions philosophiques stériles et laisser se consolider des convictions communes dans un domaine où les parti-pris et les polémiques scientifiques abondent.

De retour à Paris, après cet enrichissant séjour aux Treilles, j'ai découvert dans la bibliothèque personnelle de Louis de Broglie, un petit livre qui lui était dédié par un admirateur et ami, Jules Romains. Le titre en est : "Pour Raison Garder". Le grand écrivain s'y pose mille questions sur la science, l'espace, le temps, le principe d'incertitude, le principe de Pauli. En homme de bonne volonté qui cherche à comprendre hors du confusionnisme philosophique régnant qu'il dénonce. Nous n'avons pas voulu autre chose.