

## Discours de réception de Monsieur Jean-Louis Rivail



### L'évolution de la physique, des Lumières à nos jours

La Compagnie dans laquelle vous m'avez fait l'honneur de m'admettre a été fondée par le roi Stanislas sous le nom de Société Royale des Sciences et Belles Lettres de Nancy, et à voir le nombre de savants qu'elle a compté dans ses rangs dès sa création, il ne fait pas de doute que les sciences occupaient une place de choix dans la pensée de son fondateur, en parfaite harmonie avec son siècle. En cette année 2005 que la Ville de Nancy a choisie pour célébrer l'époque dite des Lumières et que l'ONU et l'UNESCO ont dédiée à la physique pour commémorer le centenaire des deux mémoires révolutionnaires d'Einstein, il m'est apparu opportun, quoique très présomptueux, d'évoquer devant vous l'évolution de la pensée physique au cours de ce quart de millénaire si riche en progrès de la connaissance.

Le siècle des Lumières a été très fortement marqué par un événement majeur qui a révolutionné notre perception du monde : la nouvelle physique de Newton dont le premier apôtre, en France, fut Pierre-Louis Moreau de Maupertuis, membre associé de notre Compagnie. Elle reçut par la suite une plus large diffusion grâce à la traduction française des *Principes*, par Madame du Châtelet et Voltaire. Malgré quelques réticences, en particulier chez les émules de Descartes, cette théorie s'imposa bientôt par ses succès dans l'interprétation de nombreux faits d'observation et surtout par son aptitude à rendre compte rigoureusement du mouvement des planètes. L'attraction universelle et ses conséquences devenaient alors une évidence qui, pour beaucoup à l'époque, n'était autre que la découverte d'un élément du plan de Dieu sur la Création. Ainsi Maupertuis dans son «Essai de Cosmologie» n'hésitait pas à intituler un chapitre: «Où l'on déduit des lois du mouvement des attributs de la Suprême Intelligence» et d'écrire : «Ces lois si belles et si simples sont peut-être les seules que

*le Créateur et l'Ordonnateur des choses a établies dans la matière pour y opérer tous les phénomènes du monde visible».*

Rapidement, cette théorie s'imposa comme une sorte de vérité révélée que nul ne songeait à mettre en question et dont la puissance prédictive faisait dire à Laplace : *«une intelligence qui, pour un moment donné, connaîtrait toutes les forces dont la matière est animée, si par ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ses données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux».*

En effet, une caractéristique de la mécanique de Newton est qu'elle est réversible et permet, en changeant le signe du temps, de parcourir aussi bien l'avenir que le passé. C'est ce qui permet aux astronomes de connaître la date d'événements cosmiques qui se sont produits plusieurs siècles auparavant.

Héritier direct de son prédécesseur, le 19<sup>ème</sup> siècle fut celui de la chaleur, de l'électricité et de la lumière. Un des plus beaux succès de la puissance de cette démarche fut la synthèse magistrale de l'électricité et du magnétisme, par Maxwell, dans une théorie qui par ailleurs révélait la nature de la lumière. Il apparaissait une vision cohérente du monde physique qui autorisait les physiciens à croire qu'ils étaient près de tout comprendre.

Ces triomphes de la science dite classique alimentèrent alors des courants de pensée qui, sous le vocable de matérialisme, positivisme ou réductionnisme professaient une foi absolue dans la puissance de l'esprit humain à décrypter tous les mystères du monde matériel.

Les premières lézardes, oh, à peine perceptibles, dans ce bel édifice, sont probablement le fait des chimistes. Par suite peut être des succès du calcul différentiel, il était alors plus ou moins implicitement admis que la matière était continue. Or, au fur et à mesure qu'ils progressaient dans la connaissance de ses transformations, les chimistes percevaient de plus en plus nettement les contradictions de cette conception. Ce que l'on appelait alors l'hypothèse atomique eût les difficultés que l'on sait à s'imposer, mais une fois admise, elle changea bien des choses. Le fait qu'un échantillon de matière soit constitué d'une multitude de petits corpuscules et, qui plus est, en agitation thermique, introduit dans l'harmonie de l'édifice classique la notion de désordre qui conduit à l'entropie et, partant, à l'irréversibilité, un fait d'expérience quotidienne mais ignoré de la mécanique newtonienne. Puis il y eut Henri Poincaré, un géant de la Science que notre Compagnie s'honore d'avoir compté dans ses rangs, qui montra que les équations de la mécanique classique pouvaient avoir des solutions chaotiques.

A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, il ne semblait rester qu'un point important non encore résolu, celui de l'émission lumineuse d'un corps porté à haute température, que des savants célèbres, comme Lord Rayleigh, avaient essayé de traiter à l'aide des théories existantes, mais sans succès. En 1900 Max Planck, reprit le problème par une voie différente qui consistait à découper l'énergie en petits éléments, pour ensuite faire tendre ce pas vers zéro pour obtenir une variation continue. Cette façon de faire le conduisit aux mêmes contradictions que ses prédécesseurs, mais il s'aperçut qu'en conservant une distribution discontinue de l'énergie, on aboutit à une formule qui rend parfaitement compte du phénomène. A l'aube du vingtième siècle, le mot quantum faisait son apparition dans le vocabulaire de la physique, mais ce n'était qu'un début !

Un autre dogme allait bientôt s'effondrer, celui d'un temps et d'un espace absolus, concepts à la base de la physique de Newton, comme lui même il les définissait : *«le temps absolu, vrai et mathématique, coule uniformément, sans relation à rien d'extérieur»* et *«l'espace absolu, de par sa nature, et sans relation à quoi que ce soit d'extérieur, demeure toujours semblable et immobile»*. Ce sont des définitions précises de ce que nous pensons intuitivement du temps et de l'espace. On allait s'apercevoir qu'une physique fondée sur de telles définitions était incapable de rendre compte de certains phénomènes comme celui de l'invariance de la vitesse de la lumière par rapport au mouvement de la terre. Œuvre de Lorentz, Poincaré et Einstein, la théorie de la relativité, définitivement établie en 1905 dans le mémoire célèbre d'Einstein, décrit un espace-temps à quatre dimensions, où les variables d'espace et le temps peuvent s'échanger comme le font communément les variables d'espace dans la mécanique classique. Elle établissait en outre l'équivalence entre la masse et l'énergie. Par la suite, Einstein montrera, dans la relativité généralisée, que la courbure de cet espace-temps rend compte de la gravitation, beau résultat qui cependant parle encore moins à l'imagination que la loi de Newton.

Mais le coup le plus dur restait à venir. Au cours d'une expérience destinée à montrer la réalité des ondes électromagnétiques prévues par Maxwell, expérience qui devait couronner la science classique, Hertz avait découvert, en 1887, de façon un peu inattendue, que la lumière est capable d'arracher des électrons à la matière. Il s'agissait d'un phénomène nouveau, l'effet photoélectrique. Ce qui était totalement inattendu, c'est la constatation que la vitesse des électrons émis varie linéairement avec la fréquence de l'onde lumineuse, après une fréquence-seuil qui dépend de la nature du métal irradié. Le phénomène reçut son explication en 1905 (l'année de la relativité restreinte) lorsque Einstein montra que cela ne pouvait se comprendre que si l'on abandonnait la représentation de la lumière par une onde - représentation pourtant solidement étayée par les nombreuses expériences d'interférences et de diffraction - pour lui substituer

un modèle corpusculaire mettant en œuvre de bien curieuses particules, les photons, de masse nulle, mais dotés d'une quantité de mouvement finie et se déplaçant à la vitesse de la lumière. Cette dualité était bien difficile à admettre, mais, après tout, la lumière est vraiment un cas à part dans le monde physique !

Seulement voilà que Louis de Broglie montre quelques années plus tard que, formellement, on peut décrire la dynamique d'un corpuscule matériel quelconque en étudiant la trajectoire d'une onde, dont la longueur d'onde est liée à la quantité de mouvement du corpuscule par une relation identique à celle trouvée pour le photon. D'abord considéré comme une pure spéculation intellectuelle, ce résultat reçu bientôt une confirmation expérimentale. Ainsi la dualité onde-corpuscule devenait une propriété générale de la matière, qui avait échappé aux observations car notre expérience porte sur des objets de masse trop élevée pour que les phénomènes ondulatoires puissent être observés, les longueurs d'onde étant beaucoup trop courtes. Voilà de quoi mettre les physiciens dans une situation fort inconfortable ! En effet, quoi de plus incompatible qu'un corpuscule et une onde ? On a du premier une image en considérant un balle tirée par un fusil, ou un grain de sable emporté par le vent. Il s'agit d'un petit morceau de matière parcourant une trajectoire précise et qui est susceptible de produire un impact relativement ponctuel si une surface coupe cette trajectoire. D'une onde, nous pouvons avoir une idée si l'on considère les oscillations produites à la surface d'un bassin rempli d'une eau calme et dans lequel on a jeté une pierre.

L'onde se propage dans toutes les directions et occupe tout l'espace qui lui est offert. Et nous savons que les ondes de la radio ou de la télévision couvrent tout l'espace qui entoure leur émetteur. Ainsi les mêmes électrons qui sont diffractés par un cristal sont aussi ceux qui, dans un tube de télévision, peuvent être conduits pour venir frapper l'écran en un point bien défini et y provoquer un éclair lumineux. Situation inconfortable pour un physicien disais-je, mais familière au théologien lorsqu'il s'agit de parler d'une réalité qui dépasse le cadre de nos représentations familières. C'est ce qu'avait pressenti avec beaucoup de profondeur Poincaré qui écrivait, à propos de théories apparemment contradictoires : *«Il se peut qu'elles expriment l'une et l'autre des rapports vrais et qu'il n'y ait de contradiction que dans les images dont nous avons habillé la réalité»*. On en vint ainsi à considérer qu'une particule est une onde tant qu'elle est libre de se déplacer, et qu'elle change de nature lorsqu'elle interagit avec un instrument de mesure pour donner un phénomène comparable à celui que donnerait un corpuscule matériel. C'est la *«réduction du paquet d'ondes»*. Tout ceci était bien troublant mais permettait de faire le lien avec les quanta d'énergie introduits par Planck, car les phénomènes périodiques, avec leurs modes propres, introduisent

très naturellement des discontinuités énergétiques dans les phénomènes de résonance par exemple. De fait, l'introduction du modèle ondulatoire dans la mécanique allait rejoindre et conforter les considérations fondées sur la notion de quanta en cours de développement à Copenhague. Une nouvelle mécanique était née : la mécanique quantique qui allait modifier de fond en comble notre conception du monde. Ainsi, à la lumière de la mécanique relativiste et de la mécanique quantique, la mécanique de Newton apparaît comme une double approximation valable pour les objets se déplaçant à des vitesses pas trop grandes et de masse pas trop petite, ceux de notre univers familier. Elle perd, du même coup, son statut de théorie fondamentale.

L'ennui avec les phénomènes ondulatoires est qu'ils introduisent une certaine imprécision, par exemple quant à la localisation d'un objet. A la notion de trajectoire d'un corpuscule on est obligé de substituer celle de probabilité de présence dans un élément d'espace. Traduite en mécanique, cette imprécision est à l'origine du célèbre principe d'incertitude formulé par Heisenberg qui relie les incertitudes sur des couples de grandeurs, comme la position et la vitesse. Ainsi, les informations que nous pouvons obtenir sur un système physique ne sont en général que des valeurs moyennes. Considérons un petit échantillon de radium, de quelques milligrammes. Nous savons avec certitude que la moitié des quelques milliards de milliards d'atomes qui le constituent aura subi une décomposition radioactive au bout de 1600 années, ce qui correspond à un très grand nombre de décompositions à chaque instant et définit la durée de vie moyenne d'un noyau. Si au contraire nous prélevons un atome sur cet échantillon, ce qui est tout à fait réalisable expérimentalement, il nous est impossible de dire à quel moment celui-ci se décomposera. Le déterminisme de la physique classique s'en trouve fortement mis à mal.

Parmi les nombreuses conséquences surprenantes de la mécanique quantique il y a la non séparabilité qui stipule que deux particules qui ont fait partie d'un même système ne peuvent être traitées comme deux sous-systèmes indépendants, même lorsqu'elles se retrouvent à grande distance l'une de l'autre, contrairement à l'intuition commune. Toutes ces remises en cause de concepts apparemment bien établis donnèrent lieu aux disputes homériques que l'on sait entre les tenants et les détracteurs de cette interprétation. Il manquait une expérience qui permette de trancher le débat. La première expérience vraiment concluante a été réalisée à Orsay par l'équipe d'Alain Aspect en 1982. Elle portait sur deux photons jumeaux émis simultanément dans deux directions opposées par un atome excité. Des mesures de polarisation effectuées sur chacun d'eux montraient que le résultat de la mesure faite sur l'un affectait instantanément l'autre alors que les deux particules étaient séparées de 12 mètres au moment de la mesure. Une expérience semblable réalisée au CERN à Genève

en 2000, utilisant un réseau de fibres optiques à montré que le résultat d'Orsay restait vrai lorsque les particules sont distantes de 10 kilomètres.

Ainsi les deux particules, qui faisaient partie du même système physique au moment de leur émission continuent à constituer un seul et même système, bien que séparées de plusieurs kilomètres, comme le stipule la mécanique quantique. Pire, pour obtenir l'information l'expérimentateur est obligé d'intervenir au moyen d'un appareil de mesure et, de ce fait, celui-ci fait également partie du système expérimenté, tout comme la personne qui a choisi le lieu et le moment de la mesure ! Voilà de bien étranges choses qui donnent définitivement raison à Niels Bohr et à ses collègues de Copenhague face à leurs contradicteurs, Einstein en tête.

Les conséquences épistémologiques de cette inséparabilité sont importantes. En effet, puisque l'information que nous pouvons recueillir ne résulte que de l'intervention humaine sur les phénomènes, il n'est plus possible de séparer, comme on le faisait depuis Descartes, l'homme sujet pensant et le monde extérieur qu'il veut étudier. Heisenberg a souligné ce point en écrivant : *«La science, cessant d'être spectateur de la nature, se reconnaît elle-même comme partie des actions réciproques entre la nature et l'homme»*.

De nos jours, la théorie de la relativité généralisée permet de rendre compte de nombreux phénomènes cosmiques inexplicables par la mécanique classique, justifie l'existence de la force gravitationnelle et a conduit à l'énergie nucléaire qui transforme la masse en énergie. De son côté, la mécanique quantique permet de traiter tous les phénomènes à l'échelle atomique et subatomique. Elle explique et rationalise les assemblages de noyaux et d'électrons que sont les molécules de la chimie et elle a permis de prédire l'existence de certaines particules fondamentales avant qu'on ait pu les observer. Elle rend compte des trois forces fondamentales qui gouvernent le monde subatomique et à conduit à de nombreuses réalisations qui font maintenant partie de notre vie quotidienne, comme le laser ou le transistor.

Mais les deux théories sont totalement incompatibles et la recherche d'une théorie totale, qui engloberait les deux sœurs ennemies, a été la grande préoccupation d'Einstein jusque sur son lit de mort, et demeure le défi majeur de la physique du vingt et unième siècle. Plusieurs voies sont explorées en ce moment, fondées sur différentes conjectures. L'une des plus développée est la théorie des «supercordes» qui fait intervenir de minuscules objets, sortes de cordes vibrantes dans un espace à 11 dimensions, et dont les modes propres génèrent les particules fondamentales, y compris le graviton à l'origine de la gravitation. Il est trop tôt pour prédire le succès de l'une ou l'autre de ces tentatives, mais il est peu probable qu'elle fasse disparaître ce qui, à nos yeux,

apparaît comme paradoxal dans les théories actuelles. Il est beaucoup plus vraisemblable, au contraire, qu'elle l'amplifie encore plus.

Que reste-t-il aujourd'hui de ce qui a mis en route les hommes des Lumières sur les chemins de la connaissance ? Peu de choses assurément et le rêve de Laplace de pouvoir un jour tout maîtriser apparaît maintenant bien naïf. Et, à y bien réfléchir, c'est mieux ainsi. Que serait aujourd'hui un monde sans surprise et dans lequel les grands sentiments humains se réduiraient à quelques équilibres physicochimiques ? Mais il nous reste l'essentiel, tout ce que l'enthousiasme et la méthode qui ont caractérisé cette époque ont permis de découvrir, et tout ce que ce savoir gagné a permis comme applications pratiques qui ont si profondément modifié nos modes de vie. Et cela, les hommes des Lumières le pressentaient fortement. Il suffit de se rappeler avec quelle insistance Stanislas incitait ses sujets à présenter de nouvelles inventions destinées à faciliter la vie quotidienne.

De nos jours, l'homme de science est devenu d'une grande modestie face aux défis des trois infinis qu'il affronte : l'infiniment grand, l'infiniment petit et l'infiniment complexe de la nature et de l'univers, avec comme corollaire, l'infiniment ancien puisque nous savons aujourd'hui que la nature et l'univers ont une histoire. Les nombreuses observations prouvant l'expansion de l'univers, qui irait en s'accéléralant, prêchent en faveur d'un modèle dans lequel ce processus a connu un commencement, le «big bang» et les théories actuelles permettent d'en proposer un scénario plausible. Mais elles ne permettent pas de savoir ce qui se serait passé à l'instant zéro car l'existence d'un quantum d'action a pour conséquence un quantum de durée qui ne peut être fractionné : le temps de Planck.

Certes il s'agit d'une durée extraordinairement petite, du moins dans l'échelle actuelle de temps, mais elle reste finie et, de plus, nous ne connaissons pas sa valeur au moment du big bang car elle dépend de certaines constantes universelles, dont l'invariabilité au cours de l'histoire de l'univers n'est pas assurée. Il n'empêche, ce court instant pendant lequel tout s'est joué devrait nous échapper à tout jamais et nous laisser sur notre faim de savoir. Le mystère n'est plus diffus, devant notre porte, il s'en est éloigné, à tel point que beaucoup de nos contemporains le croient aboli ou en passe de l'être. Mais il est toujours présent, compact, et le chemin pour s'en approcher est long et difficile, mettant en œuvre une énorme dose d'abstraction.

Signe des temps, Monsieur Edouard Brézin, président de l'Académie des Sciences, vient d'intituler son chapitre introductif à un ouvrage célébrant l'année de la physique : «*L'étendue de notre ignorance*» et Einstein écrivait qu'au-dessus de notre connaissance «*plane le sourire de marbre de la Nature*

*implacable, qui nous a donné le désir de la comprendre sans forcément nous en donner la capacité intellectuelle*». Mais déjà trois siècles avant lui, Pascal n'écrivait-il pas déjà : «*qu'est-ce que l'homme dans la nature ? Un néant à l'égard de l'infini, un tout à l'égard du néant, un milieu entre rien et tout, infiniment éloigné de comprendre les extrêmes ?*».

Einstein, on le sait, n'admettait pas le caractère probabiliste de la mécanique quantique et il avait élevé l'objection célèbre : «*Dieu ne joue pas aux dés*». Son interlocuteur, Niels Bohr, pouvait difficilement lui répondre autrement que par une boutade, car à l'époque la mécanique quantique n'était qu'un ensemble de recettes qui réussissent à tous coups, comme le disait Valéry de la science. De nos jours, nous l'avons vu, le statut de la mécanique quantique s'est beaucoup affermi et nous sommes en mesure de répondre. Aussi, pour conclure ces propos et illustrer l'état d'esprit dans lequel se trouvent les physiciens d'aujourd'hui, je vous livre la réponse autorisée d'un de nos contemporains, peu suspect de mysticisme, Stephen Hawking qui a pu dire : «*Dieu non seulement joue aux dés, il en jette là où ne pouvons pas les voir !*».