

PHYSIQUE

LES RÉVOLUTIONS QUANTIQUES, ENTRE SCIENCE ET FICTION

Loïc VILLAIN*

RÉSUMÉ : Au début du XX^e siècle, la représentation scientifique de la nature proposée depuis des siècles avec succès par la physique classique a été chamboulée par deux théories aussi originales qu'inattendues, : la relativité einsteinienne et la physique quantique. Ce texte se concentre sur la seconde, tentant d'illustrer les révolutions intellectuelles et technologiques qu'elle a impliquées et impliquera encore.

SUMMARY: At the beginning of the 20th century, classical physics had provided humanity with a successful scientific picture of the world. Yet, it was soon disrupted by two unusual and unexpected new theories: Einstein's relativity and quantum physics. These notes will concentrate on the second, aiming at showing the intellectual and technological revolution it has been and will be.

La science fondamentale est une quête de représentations de la nature qui se distingue par le fait que ses images apportent une connaissance objective, prédictive et réfutable. Un modèle scientifique permet à quiconque maîtrise la méthode scientifique et parle la langue adaptée de parvenir aux mêmes conclusions, si les hypothèses de base sont suffisamment précises. Tout observateur fera les mêmes prédictions sur le comportement d'un composant arbitraire de la nature, ce que l'on nomme un système, et pourra tester

* Maître de conférences en physique à l'Institut Denis Poisson (UMR CNRS 7013), Université de Tours.

le modèle en le confrontant à la réalité. Aussi convaincant que soit ce modèle, si une expérience proprement menée le contredit, il est réfuté¹.

Comme toute carte, la connaissance scientifique ne se confond pas avec le territoire qu'elle décrit. Ses modèles incluent des lois absolues avec lesquelles nul ne peut tricher mais aux domaines d'application limités. Le progrès scientifique consiste à remplacer des cartes par d'autres en partie compatibles avec elles et qui offrent une représentation plus fidèle d'une région de la nature plus étendue.

Parmi les sciences, la physique se singularise par son ambition de trouver des modèles valables pour décrire tout ce qui est mesurable. Elle se veut universelle et s'oppose en cela à la chimie ou la biologie, qui n'étudient que certains systèmes particuliers (molécules ou organismes vivants). En raison de cette prétention de la physique, dont la prise de conscience par les scientifiques joua un rôle clef dans les progrès faits au cours du siècle dernier, toute théorie physique doit inclure une modélisation de l'acte de mesure ainsi que de l'appareil ou de l'observateur qui le réalise.

Une autre spécificité de la physique est résumée par Galilée dans *l'Essayeur* (1623) : «Le livre de la Nature est écrit en langage mathématique». Alors que l'on peut discourir sur certaines sciences à l'aide de mots, seuls les objets mathématiques (nombres, figures géométriques, mais aussi objets plus abstraits comme les fonctions, les tenseurs, etc.) permettent d'exprimer des idées physiques sans ambiguïté. Par exemple, ce qui «explique» la chute des corps ou le mouvement des astres. Il existe grossièrement deux catégories de physiciens : les «théoriciens», qui conçoivent et étudient des cartes mathématiques du monde, et des «expérimentateurs», qui réalisent des expériences et des mesures, sortes d'explorations du monde permettant de tester la validité ou la précision des cartes mathématiques.

Les physiciens communiquent aussi verbalement et leurs discours sont inévitablement imprécis. Par exemple, le terme «atome», qui désignait à l'origine des entités insécables, a fini par désigner au fil des siècles des objets mathématiques différents. Selon le contexte, le physicien qui parle d'atomes se réfère donc à des objets réels ou à des représentations mathématiques distinctes de ceux-ci, qui pourront néanmoins, par abus de langage ou croyance épistémologique, être assimilées aux premiers.

1. On dit parfois, par abus de langage, «falsifié», de l'anglais *falsified*.

Ce texte vise à donner un aperçu de l'un des deux atlas les plus modernes et complets de la physique actuelle, celui de la physique quantique. Le second, celui que propose la relativité einsteinienne, ne sera pas abordé. Cette esquisse, destinée à des non-spécialistes et formulée en mots, doit être considérée comme une copie approximative de l'atlas quantique. Ce que cette représentation inachevée nous dit de la réalité est pourtant si révolutionnaire, qu'afin de la décrire brièvement, il convient de la mettre en perspective avec celle qui l'a précédée, la physique classique.

PHYSIQUE CLASSIQUE ET PERCEPTION DIRECTE

La physique classique est le modèle du monde proposé en 1687 par Isaac Newton et qui fut développé jusqu'au début du XX^e siècle, sans que ses postulats soient remis en cause. Bien qu'elle soit adaptée à la description de phénomènes visibles à l'échelle humaine – ce que l'on peut voir à l'œil nu ou faiblement équipé –, elle était révolutionnaire pour son époque et s'avéra une source prolifique de progrès bien au-delà de la physique. Pour l'illustrer, citons deux points :

- avant Newton, il était inconcevable pour les gens raisonnables que les mondes terrestre et céleste puissent être de même nature et décrits par les mêmes lois mathématiques, ce qui est pourtant désormais une évidence pour toute personne un tant soit peu instruite ;
- quand il devint certain que la planète Uranus ne se comportait pas comme le prédisaient les lois newtoniennes, les spécialistes pensèrent que cette incohérence n'était qu'apparente et suspectèrent la présence d'un corps qui n'avait pas encore été découvert. Ils supposèrent ainsi l'existence de la planète Neptune qui fut effectivement observée ensuite à l'endroit prédit par les lois de Newton.

Pour simplifier leur présentation, les principaux postulats de la physique classique sont résumés ci-dessous d'une façon imprécise, idéalisée et anachronique : en incluant certains concepts postérieurs à Newton, voire admis uniquement au XX^e siècle, et en ignorant certains phénomènes qui ne furent expliqués que par la physique moderne, notamment la radioactivité.

CORPUSCULES ET CHAMPS

Selon la physique classique, les phénomènes naturels ont lieu sur une scène immuable et universelle, l'espace absolu, où s'appliquent les lois géométriques d'Euclide. Chaque événement est associé à une localisation, que l'on peut visualiser comme un point dans l'espace, ainsi qu'à une date, point sur la frise chronologique qui matérialise le temps absolu.

En accord avec l'hypothèse atomique, selon laquelle la matière n'est pas un milieu continu divisible à l'infini, les choses matérielles sont, quant à elles, supposées être composées de boules microscopiques nommées « corpuscules » et dotées d'étiquettes qui indiquent leur comportement, comme la masse et l'espèce chimique. Tout ce que l'on voit est ainsi constitué d'entités discontinues séparées par de l'espace, lequel n'est néanmoins pas vide mais rempli de milieux continus imperceptibles et omniprésents qui s'interpénètrent et dans lesquels tout baigne, qu'on appelle les champs d'interaction. Selon ses propriétés, un corpuscule est sensible à certains champs et pas à d'autres. Quand un corpuscule ressent un champ, sa présence ou son mouvement modifie l'état de ce dernier, lequel influe en retour sur le comportement du corpuscule. Cela permet une interaction indirecte et à distance entre corpuscules par l'intermédiaire des champs, les perturbations provoquées par l'un d'entre eux étant ressenties par d'autres. À notre échelle, il semble donc exister des forces à distance entre objets macroscopiques formés de corpuscules, comme par exemple entre deux aimants.

En particulier, grâce à la théorie de l'électromagnétisme de James Clerk Maxwell (1831-1879) publiée en 1861, on en vint à considérer que tous les phénomènes physiques étaient explicables en termes de corpuscules et de deux champs d'interaction fondamentaux, le champ gravitationnel et le champ électromagnétique. En dehors de quelques phénomènes gravitationnels par essence (chute des corps, mouvement des astres, etc.), l'électromagnétisme rendait même compte quantitativement de tout ce que l'on connaissait (structure et états de la matière, réactions chimiques, etc.) tout en expliquant aussi les lois de l'optique.

Maxwell montra ainsi que le champ électromagnétique pouvait théoriquement être le siège de vibrations, les ondes électromagnétiques, dont les ondes lumineuses n'étaient qu'un cas particulier : celles dont la fréquence, c'est-à-dire le rythme de variation, les rend perceptibles pour nous grâce aux

détecteurs dont nous sommes dotés, nos yeux. Cette découverte semblait répondre définitivement à la question de la nature de la lumière, dont le caractère ondulatoire n'avait été établi qu'au début du XIX^e siècle par les expériences de Thomas Young (1773-1829) et la théorie d'Augustin Fresnel (1788-1827). En effet, sous l'impulsion de Newton, on avait longtemps cru que la lumière consistait en des corpuscules. Or, seul un modèle ondulatoire permet de rendre compte de l'existence d'interférences, qui sont un exemple du fait que parfois « lumière + lumière = obscurité » : si l'on envisage des vagues lumineuses, la superposition d'une bosse (oscillation vers le haut) avec un creux (oscillation vers le bas) produit naturellement une absence d'oscillation (de l'obscurité).

MODÈLE ET MONDE PHYSIQUE

La scène et les acteurs étant en place, il nous reste à expliquer quelle description de l'histoire est possible et à parler des spectateurs. Selon les principes de la physique classique, à tout instant, on caractérise totalement l'état d'un système physique en spécifiant le type, la position et la vitesse des corpuscules qui le composent. De ces grandeurs fondamentales, on peut en effet déduire la valeur de toutes les propriétés observables du système (volume, température, etc.), lesquelles peuvent, *a priori*, être mesurées aussi précisément qu'on le souhaite, sans perturber le système étudié. Un observateur peut donc, en principe, avoir une connaissance complète du monde physique s'il détermine l'état de tous les systèmes matériels qui existent, ainsi que ceux des deux champs d'interaction par l'intermédiaire desquels ils communiquent. En outre, les corpuscules se déplacent le long de trajectoires continues qui sont déterminées par leurs positions et vitesses initiales, par les propriétés des champs d'interaction et par les lois de Newton. En conséquence, la connaissance de l'état du monde à un instant quelconque permet en théorie de déterminer parfaitement son état à un autre moment, antérieur ou postérieur. Il en découle que l'évolution est déterministe, ce qui se manifeste par exemple par le fait que les mêmes causes mènent toujours aux mêmes effets. En pratique, si l'on ne peut pas prédire avec certitude sur quelle face un dé va tomber, c'est uniquement en raison de notre connaissance imparfaite de son

état initial et du fait qu'une petite variation de celui-ci peut avoir de grandes conséquences (cf. l'effet papillon).

Ainsi, à l'aube du XX^e siècle, la physique classique proposait un modèle du monde physique qui permettait à certains tenants du réalisme scientifique pour lesquels les modèles scientifiques sont un portrait de la réalité, de penser que l'on avait compris la nature du monde et que seuls restaient à étudier certains détails secondaires. Nul ne suspectait que l'étude minutieuse de phénomènes lumineux conduirait à la naissance de deux cadres théoriques qui remirent en cause la totalité des évidences newtoniennes et qui, malgré leurs succès indéniables, restent à ce jour irréconciliables : la relativité einsteinienne (1905 & 1915) et la physique quantique. L'apparente évidence de la physique classique et le fait qu'elle soit désormais en partie entrée dans le savoir collectif expliquent d'ailleurs que certains profanes refusent d'accepter, malgré leur validation expérimentale, les modèles moins intuitifs qui l'ont supplantée. Leur justesse et leur nécessité n'apparaissent que lorsque l'on étudie, avec rigueur scientifique, des phénomènes difficilement perceptibles.

LUMIÈRE ET MATIÈRE

Le modèle quantique de la nature et ses postulats semblent moins artificiels quand on connaît leur origine. Comme on l'a rappelé ci-dessus, la description classique du monde suppose une matière discontinue faite de corpuscules et une lumière continue, vibration du champ électromagnétique. Cette représentation évolua sous l'influence de résultats expérimentaux pour mener à une conception duale, que nous allons à présent décrire, laquelle céda ensuite la place à un modèle plus complet et plus abstrait.

En effet, Max Planck (1848-1949), en 1900, et Albert Einstein (1879-1955), en 1905, montrèrent que certains phénomènes ne pouvaient être décrits quantitativement que si l'on supposait que l'énergie lumineuse était répartie non pas continûment, sous forme d'ondes, mais par paquets discontinus, nommés depuis *quanta*, en contradiction avec la théorie de Maxwell. Ils furent conduits à cette conclusion en cherchant à expliquer comment la couleur des objets varie avec leur température, ce que l'on constate dans le cas d'une barre de fer chauffée au rouge, ainsi que les propriétés de matériaux qui, lorsqu'on

les éclaire, sont le siège de courants électriques, qu'on utilise par exemple dans certains panneaux solaires.

Par ailleurs, au terme de diverses expériences, Ernest Rutherford (1871-1937) conclut en 1911 que les atomes étaient comme des systèmes planétaires miniatures avec, au centre, un noyau qui concentre la majorité de la masse et, en orbite autour de celui-ci, des électrons corpusculaires liés par interaction électromagnétique. Or, les lois classiques qui décrivaient en détails ce modèle atomique prédisaient aussi que les électrons devaient émettre un rayonnement électromagnétique composé d'une continuité de couleurs, à la manière d'un arc-en-ciel, et converger vers le noyau en un temps très bref. La physique classique fournissait ainsi un modèle atomique qui élucidait nombre de phénomènes mais qui ne parvenait pas à dire pourquoi un élément chimique donné n'émet que certaines couleurs, comme en témoigne par exemple l'apparence caractéristique du cuivre, ni à rendre compte de la persistance de la matière.

La situation devint encore plus surprenante quand Niels Bohr (1855-1962) comprit, en 1913, que l'on parvenait à expliquer les faits expérimentaux en supposant qu'autour des noyaux, les électrons ne pouvaient occuper que certaines orbites spécifiques, sur lesquelles ils n'émettaient aucun rayonnement électromagnétique, et que les couleurs observées correspondaient à l'émission de leur surplus énergétique quand ils changeaient instantanément d'orbite, le tout en contradiction flagrante avec certains principes fondamentaux de la physique classique.

Mais le plus grand bouleversement eut lieu quand Louis de Broglie (1892-1987) montra, en 1924, que si, à tout électron pourtant envisagé comme un corpuscule, on associait une onde de matière, cette onde devait se refermer sur elle-même pour persister et correspondre à un état stationnaire, ce qui prohibait naturellement certaines orbites et impliquait leur quantification, en accord avec le modèle de Bohr et les observations, qui trouvaient dès lors une explication ondulatoire.

En conclusion, les progrès rapides réalisés au début du XX^e siècle impliquaient que, contrairement à ce que l'on avait longtemps cru, la matière et la lumière faisaient preuve de dualité, se comportant, selon l'expérience réalisée, soit comme des milieux continus, soit comme des ensembles d'entités discontinues. Comme tout modèle ayant l'ambition d'être fondamental est tenu d'expliquer l'ensemble des phénomènes observables, un changement de paradigme était requis. Pour comprendre le processus dialectique qui en découla,

considérons la question analogue suivante : quelle pourrait être une figure géométrique qui, lorsqu'on la regarde, semble parfois être un rectangle, et parfois un disque ? Formulée ainsi, cette interrogation suggère que la réponse attendue est une figure bidimensionnelle, semblable à ce que l'on observe. Néanmoins, la seule possibilité pour garder une cohérence logique globale est de transcender l'image première et d'envisager des figures mathématiquement plus complexes, par exemple un cylindre, c'est-à-dire non pas une figure plane, mais un solide dont l'apparence dépend de l'angle sous lequel on l'observe.

Le passage du classique au quantique procède du même type de saut conceptuel : la modélisation de tout système élémentaire, vu classiquement comme un corpuscule ou comme une onde, repose en physique quantique sur un objet physico-mathématique sophistiqué qui n'est ni l'un ni l'autre, ou un peu des deux à la fois. Cette révolution conceptuelle ne se fit pas sans errances, mais valut le prix Nobel à de nombreux physiciens quantiques. Parmi les étapes intermédiaires notables, citons, dès 1925, l'émergence de la mécanique ondulatoire d'Erwin Schrödinger (1887-1961) et celle de la mécanique matricielle de Werner Heisenberg (1901-1976). Bien que la première conduisît, à tort, à l'idée encore présente dans la littérature vulgarisée que l'on peut considérer que « tout est onde » et, bien que la deuxième fût radicale, dans la mesure où elle renonçait, dans une approche positiviste, à modéliser les choses pour ne s'intéresser qu'aux observations, Paul Dirac (1902-1984) prouva, la même année, qu'elles étaient mathématiquement équivalentes.

À ce jour, les lois quantiques sont un ensemble de postulats mathématiques, dus notamment à Dirac, sur lesquels les physiciens sont unanimes. Elles permettent de décrire de nombreux phénomènes et ont de multiples applications : la physique quantique est derrière la quasi-totalité de la technologie moderne. Néanmoins, nous sommes encore loin d'une compréhension totale de son discours sur la nature : ces lois peuvent être formulées de plusieurs façons mathématiques équivalentes, et il reste de la place pour diverses interprétations, voire pour des prédictions distinctes dans des situations subtiles, en particulier parce que les implications précises de la « mesure d'une grandeur physique » et la description du passage du quantique vers le classique restent imparfaitement compris.

La suite de ce texte présente certains principes fondamentaux de la physique quantique en les opposant aux postulats classiques rappelés ci-dessus. Pour simplifier, l'interprétation adoptée est la plus courante, celle qui est

enseignée dans les cours introductifs et utilisée dans les situations les plus élémentaires. Dans cette approche, l'observateur ou l'appareil de mesure sont décrits classiquement, contrairement au système étudié. On ne mentionnera qu'en passant certaines des approches plus ambitieuses qui tentent de décrire des phénomènes plus complexes ou d'intégrer une description quantique de l'observateur.

POSTULATS QUANTIQUES, CONSÉQUENCES PHILOSOPHIQUES

La principale particularité du modèle quantique est le rôle central qu'y joue la notion d'observation. Certains physiciens considèrent même que la physique quantique parle uniquement de ce que l'on peut mesurer, et pas d'une éventuelle réalité sous-jacente. Ses lois n'incluent par exemple pas de modèles d'objets réels en tant que choses localisées dans l'espace, mais stipulent au contraire que l'existence de tels modèles est incompatible avec les résultats expérimentaux. Les objets réels ne vivent pas dans l'espace où, à la façon de Newton, nous nous imaginons.

ÉTAT QUANTIQUE

Le postulat quantique de base est qu'à tout système, quelle que soit sa taille, est associé, à chaque instant, un état quantique, objet mathématique abstrait qui évolue au cours du temps et indique tout ce que l'on peut savoir du système en l'observant. Cet être abstrait est, dans une interprétation réaliste, la représentation quantique de l'objet réel. Dans le cas de particules, il se manifeste, selon l'expérience réalisée, comme un corpuscule ou une onde, qui sont eux-mêmes, dans une formulation plus moderne, considérés comme des états excités de champs quantiques, ces derniers étant les êtres plus fondamentaux.

L'état quantique d'un système permet en particulier de prédire les possibles résultats de mesures de ses propriétés. En effet, une spécificité quantique est que, sauf préparation singulière d'un système, le résultat d'une mesure est indéterminé avant qu'elle n'ait lieu, l'état quantique ne donnant que la probabilité d'obtenir chacun des résultats envisageables.

Par exemple, dans le cas de la désintégration d'un atome radioactif, phénomène dont Georges Gamow (1904-1968) montra en 1928 qu'il était d'origine quantique, on ne peut pas dire, avant de l'observer, si l'atome existe encore ou s'il a cédé la place à d'autres particules. On ne peut que connaître la probabilité d'observer un atome ou ses restes. Insistons sur le fait qu'il ne s'agit pas d'une ignorance de notre part : l'atome est dans un état quantique sans équivalent classique et pourra, par exemple, s'écrire schématiquement, s'il y a une probabilité non-nulle que la désintégration ait eu lieu au moment de l'observation :

| atome radio-actif $\rangle =$ | atome encore existant $\rangle +$ | résultat de la désintégration \rangle

Cette équation ne signifie pas que l'atome s'est désintégré, ou pas, et que ne le savons pas. Elle dit qu'il n'est dans aucun de ces deux états classiques, mais dans une superposition de ceux-ci. Les objets quantiques sont intrinsèquement indéterminés et probabilistes. Une particule quantique n'a par exemple ni position ni vitesse tant qu'on ne les mesure pas. Néanmoins, son état quantique nous permet de prédire précisément la probabilité d'obtenir telle ou telle valeur et l'équation de Schrödinger indique même comment l'état et les probabilités évoluent au cours du temps. Ainsi, bien qu'aléatoire, le modèle quantique ne l'est pas totalement. Il inclut un déterminisme qui concerne toutefois des objets inobservables : les états quantiques. Le physicien philosophe Bernard d'Espagnat (1921-2015) parle pour cela de «réel voilé», une autre représentation visuelle issue d'une tentative de se raccrocher à des images compatibles avec nos perceptions directes étant d'imaginer les grandeurs quantiques comme fluctuantes. Le monde microscopique, où s'exprime pleinement la physique quantique, est alors conçu comme une sorte de bouillon très subtil dont les fluctuations sont dissimulées à notre échelle.

Le voile quantique affecte aussi les grandeurs considérées comme fondamentales et parfaitement mesurables en physique classique : position, durée, masse, etc. Elles forment en général des paires de grandeurs complémentaires. Ainsi, plus on détermine précisément la valeur de l'une d'elle, moins celle de l'autre est déterminée, et réciproquement, le tout sans qu'il s'agisse d'une limitation de nos appareils de mesure. Cette propriété peut d'ailleurs être qualitativement rapprochée de la dualité onde/corpuscule. En effet, si l'on mesure la position d'une particule de masse non nulle, on tend

à la localiser et à lui donner un aspect corpusculaire, ce qui se fait au détriment de la détermination de sa vitesse, laquelle est une propriété plus naturellement associée à une onde.

INDÉTERMINISME ET COMPLÉMENTARITÉ

Cette description mentionne en passant un autre aspect fondamental du modèle quantique du monde : toute mesure est susceptible de modifier le système étudié. Par exemple, on sait depuis longtemps réaliser des expériences d'interférence avec des électrons ou d'autres particules de matière. Toutes ont témoigné de leur caractère ondulatoire. Et chaque fois que, dans des versions sophistiquées de ces expériences, on a voulu déterminer leur trajectoire, les particules ont cessé de se comporter comme des ondes car on essayait de leur donner un attribut uniquement corpusculaire. Les résultats ont toujours été en accord avec la théorie quantique et en désaccord avec les prédictions intuitives classiques selon lesquelles les objets élémentaires sont des corpuscules ou des ondes, et pas un intermédiaire plus abstrait.

L'indéterminisme et la complémentarité bousculent en fait encore plus nos représentations classiques. Par exemple, ils portent aussi sur certaines des étiquettes attribuées classiquement aux corpuscules, et il existe des particules quantiques qui ne peuvent pas avoir simultanément une identité et une masse, par exemple les élusifs neutrinos. Si l'on mesure leur masse, leur type est indéterminé. Et si l'on procède ensuite à la détermination du type puis à nouveau à celle de la masse, on ne retrouvera pas nécessairement la même valeur pour cette dernière, bien qu'on étudie toujours la même particule.

En outre, deux particules qui ont une origine commune peuvent être intriquées : toute mesure faite sur l'une affecte aussitôt l'état de l'autre, indépendamment de la distance qui les sépare. Elles ne peuvent pas être considérées comme deux entités séparables et localisables, ainsi que le confirma expérimentalement Alain Aspect (1947-...) en 1982, dans des travaux qui lui valurent le prix Nobel de physique 2022. Ce phénomène, prédit en 1935 par Einstein, Boris Podolsky (1896-1966) et Nathan Rosen (1909-1995), mena au célèbre « paradoxe EPR » car ceux-ci crurent, à tort, qu'il permettait une communication à distance instantanée, en violation d'un principe de base de la relativité restreinte.

Pour conclure sur les étrangetés quantiques et leurs conséquences ontologiques, considérons brièvement l'expérience de pensée proposée par Schrödinger en 1935 : on enferme un chat dans une pièce où du poison est diffusé si un atome radioactif se désintègre. D'après la physique quantique, avant observation, le chat n'est ni mort ni vivant, car l'atome n'est ni désintégré, ni non-désintégré. Cette situation soulève diverses questions, notamment concernant ce qui se passe si la mesure est effectuée par une machine et qu'aucun être humain n'en prend connaissance avant longtemps. À quel moment l'état du chat est-il déterminé ? Une mesure inconsciente a-t-elle le même effet qu'une mesure consciente ? Et le chat lui-même, est-il un observateur ? La théorie des mondes multiples d'Hugh Everett (1930-1982), l'une des tentatives raisonnables de résoudre ce paradoxe en incluant l'observateur dans la description, va jusqu'à proposer l'existence d'une infinité de réalités parallèles, illustrant certaines des difficultés conceptuelles soulevées par la physique quantique.

Enfin, autre question naturelle : à quelle échelle se fait la transition entre le quantique et le classique ? En 2010, une équipe de chercheurs de l'Université de Californie a réussi à mettre un diapason de 60 micromètres dans un état vibrant et non-vibrant à la fois, ce qui a nécessité de grandes précautions car un phénomène nommé « la décohérence » indique que toute superposition d'états tend rapidement vers un unique état classique si le système interagit avec son environnement. L'étude expérimentale de la décohérence de particules de lumière isolées a confirmé les prédictions théoriques concernant ce phénomène et valu en 2012 le prix Nobel de physique à Serge Haroche (1944-...).

TECHNOLOGIE QUANTIQUE

La physique quantique a non seulement révolutionné notre façon de penser le monde mais elle nous a aussi permis de comprendre des phénomènes naturels face auxquels le modèle classique ne proposait aucune explication cohérente : le principe des liaisons chimiques, la radioactivité et, de manière plus générale, la physique nucléaire et celle des particules subatomiques. En conjonction avec la relativité einsteinienne, elle a même mené Dirac à prédire, en 1928, l'existence de l'antimatière, sorte d'image miroir légèrement

déformée de la matière qui nous compose, qui, malgré sa réputation de fiction scientifique, est désormais utilisée dans la plupart des hôpitaux en imagerie médicale (PET scan).

Savoir mieux modéliser le fonctionnement de la nature a également eu de nombreuses retombées technologiques, puisque les applications de la physique quantique, bien que discrètes, sont omniprésentes dans notre quotidien. Elle est par exemple derrière :

- la totalité des gadgets modernes, car toute l'électronique (téléphone, écran HD, etc.) repose sur une miniaturisation rendue possible par la description quantique de matériaux ;
- les disques durs dans le fonctionnement desquels intervient la *spintronique*, version subtile de l'électronique dans laquelle est pris en compte le *spin* des électrons, une propriété purement quantique que l'on peut très imprécisément décrire comme une sorte de rotation des particules sur elles-mêmes ;
- le laser, utilisé tant dans l'industrie (découpe, métrologie, etc.), qu'en médecine, ou dans la transmission d'information, et dans lequel une couleur bien déterminée s'accompagne d'un nombre de particules indéterminé ;
- le développement de nouveaux matériaux aux propriétés très distinctes de celles de ceux que nous côtoyons au quotidien, notamment les supraconducteurs, qui permettent de produire des champs magnétiques intenses cruciaux, par exemple, en imagerie médicale (IRM) ;
- la photonique, qui remplace les courants électriques par des faisceaux lumineux (à la façon dont la fibre optique succède aux fils électriques usuels), ce qui permet des transferts plus efficaces et rapides d'information.

Un phénomène aussi étonnant que l'intrication a quant à lui permis de développer des méthodes de cryptographie quantique, technologie dans laquelle ont investi des États et des entreprises privées. Il en existe plusieurs, et d'autres sont en développement, l'un des principes sous-jacents étant que des personnes qui communiquent par échange d'états quantiques sont informées de toute tentative d'intrusion par un agent externe car celle-ci modifie l'état du message. En 2016, des scientifiques ont ainsi transmis un message *quantiquement* sécurisé qui a franchi 7400 km de distance, depuis la Chine jusque l'Autriche, par l'intermédiaire d'un satellite, Mozi, situé à 500 km d'altitude.

Ces dernières années, on a même assisté aux premiers pas convainquants de ce qui s'annonce comme un gigantesque bouleversement pour notre société : l'informatique quantique. L'élément de base d'un ordinateur classique est un bit, c'est-à-dire un système physique qui peut occuper deux états distincts, lesquels permettent d'encoder un 0 ou un 1. À l'aide d'un grand nombre de bits, on compose des listes de 0 et de 1 qui correspondent à des données ou des instructions. Dans un ordinateur quantique, le bit est remplacé par un q-bit, système physique qui peut se trouver dans une infinité d'états quantiques distincts, lesquels sont des superpositions de 0 et de 1 classiques. En pratique, un ordinateur quantique est notamment susceptible d'exécuter des tâches bien plus vite. Par exemple, en septembre 2019, Google a publié des résultats obtenus avec un ordinateur comportant 49 q-bits qui a fait en 2,5 jours ce qui prendrait 10 000 ans à un ordinateur normal. Plus récemment, en décembre 2020, la Chine a présenté *Jiuzhang*, le premier ordinateur quantique photonique doté de 76 q-bit. Les premiers tests lui ont permis de réaliser avec succès en 20 secondes un calcul qui nécessiterait 600 millions d'années sur une machine conventionnelle. La première entité (état ou entreprise) qui disposera d'un véritable ordinateur quantique deviendra si puissante par rapport à ses concurrents ou adversaires qu'elle atteindra ce que l'on nomme parfois la suprématie quantique. Elle sera capable de parvenir à des résultats qui paraîtront magiques à ceux qui n'auront pas accès à une technologie équivalente. Dans une société idéale, cela pourrait contribuer à résoudre de nombreux problèmes comme celui du changement climatique ou à développer de nouveaux vaccins encore plus rapidement en rendant, par exemple, plus bref le temps nécessaire pour faire certains calculs ou tout simplement en ouvrant la porte à des modélisations plus réalistes et donc plus précises. Les spécialistes restent toutefois partagés quant à la proximité temporelle de ce qui sera indéniablement une révolution sociétale, géopolitique, économique, technologique, etc. En effet, le fonctionnement des ordinateurs quantiques repose sur des états superposés, lesquels sont difficiles à produire et à garder en raison de la décohérence. En outre, on ne parle pas avec un ordinateur quantique comme avec un ordinateur classique. Les instructions doivent être rédigées dans un langage particulier et, à ce jour, on ne sait exprimer de manière adaptée que des consignes très élémentaires. L'enjeu est cependant tel qu'en janvier 2021, le gouvernement français a lancé le plan quantique, un investissement de

1,8 milliards d'euros sur 5 ans afin d'essayer de rattraper le retard de notre pays sur divers autres.

Même si l'on entend souvent parler de quantique dans des contextes qui n'ont rien à voir avec ce dont il s'agit réellement (« médecine quantique », etc.), la physique quantique est une science exacte bien maîtrisée par les spécialistes qui a et aura dans un futur plus ou moins proche des conséquences de plus en plus profondes sur la vie de chacun d'entre nous.

BIBLIOGRAPHIE

ASLANGUL (Claude) (2016), « Théorie quantique et médecine : le point de vue d'un physicien », *Hegel*, vol. 2, n° 2, p. 130-139

(<https://www.cairn.info/revue-hegel-2016-2-page-130.htm>)

ASPECT (Alain) (2019), *Einstein et les révolutions quantiques*, CNRS Éditions, Paris.

DAMOUR (Thibault) & BURNIAT (Mathieu) (2016), *Le mystère du monde quantique*, Dargaud, Paris.

D'ESPAGNAT (Bernard) (1994), *Le réel voilé*, Fayard, Paris.

FEYNMAN (Richard) (1992), *Lumière et matière : une étrange histoire*, Seuil, Paris.

GISIN (Nicolas) (2012), *L'impensable hasard*, Odile Jacob, Paris.

HAROCHE (Serge) (2020), *La Lumière révélée : De la lunette de Galilée à l'étrangeté quantique*, Odile Jacob, Paris.

MOUCHET (Amaury) (2015), *L'étrange subtilité quantique*, Dunod, Paris.

O'CONNELL (A.D.) *et al.* (2010), « Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator », *Nature*, vol. 464, p. 697-703.

PENROSE (Roger) (2007), *À la découverte des lois de l'univers : La prodigieuse histoire des mathématiques et de la physique*, Odile Jacob (Paris).

<https://toutestquantique.fr/>

<https://lejournal.cnrs.fr/billets/quest-ce-que-le-hasard-quantique>

