

Relativité, mécanique quantique et ruptures épistémologiques

Pierre Marage
Faculté des Sciences
Université Libre de Bruxelles

Si beaucoup d'identités paraissent aujourd'hui « à la dérive », la matière au moins possède-t-elle une identité forte, garantie par la science, sur laquelle nous appuyer ?

Ou, au contraire, les révolutions de la physique au XXème siècle (théorie de la relativité, mécanique quantique) ont-elles contribué – bien au-delà des sphères scientifiques – à un sentiment général d'instabilité ?

On tentera dans cet exposé de recadrer la portée scientifique, épistémologique et culturelle de ces révolutions, tout en s'interrogeant sur la place de la science moderne dans la constitution de notre propre identité.

*Conférence donnée à Marseille le 5 avril 2007
sous le titre*

*« **Identité de la matière et révolutions scientifiques** »
dans le cadre du cycle « **Identités à la dérive** »
des conférences **Echanges et Diffusion des Savoirs***

Les organisateurs du cycle « *Identités à la dérive* » me font l'honneur de m'inviter à réfléchir avec vous ce soir à la double question de *l'identité de la matière* (existe-t-elle ? en quel sens ?) et de son éventuelle *dérive*, accompagnant les révolutions scientifiques du XXème siècle.

Avec les révolutions du XXème siècle, la Relativité, la Mécanique quantique, les objets de la physique (espace, temps, matière, énergie) et les fondements mêmes de sa démarche (principe de causalité) ont été soumis à des révisions radicales, si on les compare aux conceptions de Galilée, Newton, Laplace. Faut-il dès lors considérer que l'identité de la matière se soit fragilisée, qu'elle soit partie « à la dérive » ? Ou plutôt que notre connaissance de la nature a certes été profondément modifiée, mais que son identité même ne s'en trouve pas menacée ?

J'essaierai dans cet exposé, plutôt que de tenter de prendre position sur une alternative qui me semble ressortir davantage de la méta-physique que de la physique elle-même, de présenter brièvement le *contenu* de ces révolutions scientifiques majeures de la physique du XXème siècle. Je tenterai de discuter la manière dont « la matière », « la nature » (quoi que recouvrent ces mots) semblent se manifester à nous, quand nous les interrogeons de cette manière très spécifique qui est celle de la physique contemporaine. Ma réflexion se voudra donc celle d'un praticien de la physique, dont le métier est de mener avec la nature, à l'aide de grands instruments, un dialogue dont l'objectif est de découvrir en elle – ou de *mettre* en elle ? – toujours plus de cohérence et d'intelligibilité.

Je tenterai ensuite de montrer encore plus brièvement comment les révolutions de la physique ont conduit à des réflexions renouvelées sur les modes de production des savoirs scientifiques, leur statut et leur spécificité, et sur la position de la science parmi l'ensemble des pratiques et des savoirs humains. Au-delà de son implication toujours plus grande dans le monde, quelle certitude la science a-t-elle d'elle-même et de ses résultats ? Et comment assume-t-elle son progrès et ses évolutions, si celles-ci sont de nature révolutionnaire ?

Ces deux questionnements – portant d'une part sur le contenu des savoirs scientifiques concernant la nature et la matière, et d'autre part sur la nature de la science – ne peuvent être confondus, mais ils ne peuvent non plus être réellement séparés, car les révolutions de la physique du XX^{ème} siècle ont profondément marqué la réflexion sur la science elle-même – et je ne pourrai malheureusement discuter ici ni les révolutions en mathématiques (la reconnaissance des géométries non-euclidiennes, les théorèmes d'incomplétude), ni celles de la biologie et des autres sciences naturelles (en particulier la révolution darwinienne).

Quant à savoir si les révolutions dans notre connaissance de la matière et dans la réflexion critique sur la science peuvent ou non déstabiliser notre relation au monde, à nous citoyens du XXI^{ème} siècle pour lesquels la science joue un rôle si important, quant à savoir en un mot si ces identités sont *à la dérive*, ici non plus il n'appartient pas au praticien de la physique d'apporter une réponse particulièrement autorisée.

La théorie de la Relativité

A la fin du XIX^{ème} siècle, la physique apparaît comme un monument reposant sur des piliers inébranlables. C'est la science la plus anciennement constituée, qui depuis Galilée et Newton a servi de modèle à toutes les sciences expérimentales et qui a constitué l'une des sources de la modernité et des Lumières. Le premier pilier de cette physique est la mécanique newtonienne, qui décrit parfaitement le « système du monde », des mouvements terrestres à ceux des astres. Le deuxième pilier est la théorie électromagnétique de Maxwell, qui non seulement a réalisé la fusion de l'électricité et du magnétisme mais y a incorporé la lumière, comprise comme une onde électromagnétique. Le troisième pilier de la physique est la thermodynamique de Carnot, Helmholtz et Kelvin, qui a dégagé de nouveaux concepts universels, l'énergie, l'entropie, et qui s'articule à la théorie atomiste de la matière à travers la mécanique statistique de Boltzmann et de Gibbs.

La physique apparaît donc à beaucoup comme une science « presque achevée », selon les paroles de Lord Kelvin, – même si l'obscurcissent encore deux « petits nuages » : d'une part l'impossibilité de déceler le mouvement de la Terre à travers l'éther, qui est supposé porter les ondes électromagnétiques, et d'autre part l'incapacité à rendre compte du spectre du rayonnement émis par un corps, en fonction de sa température. Nous présenterons successivement ces deux « nuages », – qui déboucheront respectivement sur rien moins que la théorie de la Relativité et la Mécanique quantique !

En ce qui concerne la vitesse de la lumière, l'expérience de Michelson et Morley a révélé dans les années 1880 que la vitesse – finie – de la lumière apparaît constante, quelle que soit la direction dans laquelle on la mesure. La loi d'addition des vitesses, qui découle de la mécanique de Newton, stipule pourtant que, vue du quai, la vitesse d'un voyageur qui se déplace dans un train est obtenue en ajoutant ou en soustrayant la vitesse de son déplacement dans le train à la vitesse du train par rapport au quai. De même, la loi d'addition newtonienne des vitesses prescrit que, la Terre étant en mouvement par rapport à l'éther porteur des ondes électromagnétiques, la vitesse de la lumière mesurée sur terre devrait varier selon la direction

du mouvement de la Terre par rapport à l'éther – par exemple au cours de ses rotations diurne ou annuelle. Et pourtant il n'en est rien : la vitesse de la lumière apparaît constante, indépendante de sa direction.

La lumière semble donc obéir au « principe de relativité ». Ce « principe », dégagé par Galilée et qui va guider les recherches d'Henri Poincaré et d'Albert Einstein, stipule que rien ne permet de distinguer repos et mouvement rectiligne uniforme. Il en va ainsi lorsque deux trains sont d'abord côte à côte à l'arrêt dans une gare, puis que l'un d'eux se mette doucement en mouvement : un passager ne peut savoir, en observant seulement l'autre train, si c'est le sien qui se déplace alors que l'autre est resté à quai, ou si son train est resté immobile alors que l'autre s'est mis en mouvement en sens inverse. De manière générale, le principe de relativité stipule que l'expression mathématique des lois de la physique n'est pas modifiée par un mouvement de translation uniforme, – sinon le mouvement pourrait être reconnu.

Si le principe de relativité est universellement valable, alors la vitesse de la lumière (et de toutes les ondes électromagnétiques) doit être invariante, car selon la théorie de Maxwell elle est fixée par les constantes fondamentales de l'électricité et du magnétisme dans le vide. L'expérience confirme cette invariance mais, comme on l'a vu, celle-ci viole la loi d'addition des vitesses ! L'analyse de ce problème aura pour conséquences rien moins que de faire s'évanouir les notions d'espace et de temps absolus, et de remanier en profondeur notre appréhension du réel.

Pour rendre compte (je simplifie le récit historique) des résultats surprenants de l'expérience de Michelson et Morley, Poincaré et Einstein se livrent au tout début du XXème siècle à une analyse très concrète, terre à terre même, de la réalisation d'une expérience de physique. Avons-nous affaire *directement*, en physique, à « la nature », à « la matière », à « l'espace », au « temps » ? Non. C'est toujours à travers un *dispositif expérimental* que se réalise notre relation à la nature : position d'une aiguille sur un cadran, enregistrement d'un coup dans un compteur. Or l'invariance de la vitesse de la lumière est une donnée expérimentale. Mais les concepts, même paraissant « évidents » comme ceux d'espace et de temps, qui vont au-delà de l'expérience, doivent être traités avec prudence...

Considérons d'abord la notion intuitivement claire, semble-t-il, de simultanéité de deux événements. Pour reprendre un exemple proposé par Einstein, on peut dire qu'un train entre en gare à 7 heures car l'arrivée du train coïncide avec la position de l'aiguille de l'horloge de la gare sur le chiffre 7. Ces deux événements, qui se déroulent au même endroit, peuvent sans ambiguïté être dits simultanés. Mais comment savoir si deux événements sont simultanés alors qu'ils sont séparés spatialement ? Comment savoir, dans notre exemple, si deux trains entrent *simultanément* dans deux gares *différentes* ? Il faut pour cela que les horloges des deux gares marquent la même heure (en supposant qu'elles se réfèrent toutes deux par exemple au temps de Greenwich). Mais comment être sûr que les heures marquées par les deux horloges correspondent *vraiment* à la même heure, marquent *vraiment* le temps de Greenwich ? Comment vérifier, en d'autres termes, que toutes les horloges de toutes les gares du monde sont effectivement synchronisées ? Il n'y a pas d'autre ressource que de définir entre elles une *convention de synchronisation*, grâce à l'échange d'un signal. La reconnaissance du caractère conventionnel de l'opération constitue un trait essentiel de la pensée de Poincaré, qui découle de sa réflexion sur la nature même de la physique.

La synchronisation serait aisée s'il était possible d'émettre, d'un point quelconque de l'univers, un signal se propageant à vitesse infinie, et qui serait donc reçu « simultanément » dans l'univers entier. L'observation de ce signal synchroniserait automatiquement toutes les horloges, et un « temps absolu » s'en trouverait défini. Mais la physique ne connaît pas de tels signaux. Elle ne nous propose que des signaux – dont la lumière et les autres ondes

électromagnétiques – qui se propagent à vitesse finie, même si cette vitesse est très grande par rapport aux vitesses usuelles.

Dès lors, Poincaré et Einstein proposent d'assurer la synchronisation des horloges par l'échange de rayons lumineux, selon la procédure suivante. Soient deux horloges A et B, à synchroniser. Au moment où elle marque le temps t , l'horloge A envoie vers B un signal lumineux ; ce signal, réfléchi par B, revient à l'horloge A au moment où celle-ci marque $t + \Delta t$. Par convention, nous convenons que le temps de B à l'instant où elle a reçu le signal est $t + 1/2\Delta t$. Ceci assure la synchronisation des deux horloges, qui pourra ensuite être étendue de proche en proche à tous les points de l'univers.

Prenez maintenant le cas où l'horloge A est située au milieu d'un train se déplaçant à une vitesse comparable (mais nécessairement inférieure) à celle de la lumière, et où deux horloges, B et B', sont placées aux deux extrémités du train. Pour un voyageur à bord du train, un signal lumineux émis par A atteint B et B' simultanément. En effet, ces deux horloges marquent la même heure si elles ont été synchronisées à bord du train, puisqu'elles sont situées à égales distances de A (la moitié de la longueur du train), et que la lumière se propage à la même vitesse dans les deux sens. Considérons maintenant un observateur sur le quai qui a, lui aussi, synchronisé ses propres horloges, disposées tout le long de la voie. Pour lui, la distance à parcourir par le signal lumineux pour atteindre la queue du train est plus courte que pour atteindre la tête, qui fuit à grande vitesse devant le signal. Mais, pour lui aussi, la lumière va à la même vitesse dans les deux sens, sans s'ajouter à celle du train, contrairement à ce qui se passerait pour un voyageur newtonien. Le signal atteint donc la queue du train alors que l'horloge placée sur le quai marque une heure inférieure à celle qu'indiquera l'horloge du quai située en face de la tête du train quand le signal atteindra celle-ci. Les deux événements considérés comme simultanés par le voyageur ne le sont donc pas pour l'observateur sur le quai !

Conclusion révolutionnaire : le physicien, qui doit admettre d'une part les données de l'expérience sur la constance de la vitesse de la lumière et d'autre part le recours à une convention de synchronisation des horloges, doit reconnaître que la notion même de simultanéité est *relative*, qu'elle dépend de l'observateur. Dès lors, l'idée d'un temps absolu, universel s'évanouit. Et du coup, la mécanique de Newton, qui suppose implicitement un tel temps universel, devient « fausse » ! « *Newton, pardonne-moi* » dira Einstein.

A partir d'ici, il découle de calculs mathématiques simples tenant en une paire de pages, que le temps – défini comme il se doit à travers la synchronisation des horloges – ne s'écoule pas « de la même manière » pour tous les observateurs : ainsi, le « temps propre » mesuré par l'horloge d'un observateur qui est en mouvement rapide par rapport à moi semble s'écouler « plus lentement » que celui qui est marqué par ma propre horloge (transformation dite « de Lorentz »). Ce phénomène de « dilatation du temps » est vérifié expérimentalement, sans aucune ambiguïté. Prenons l'exemple de particules instables, les muons, produits lors des interactions du rayonnement cosmique de haute énergie avec les couches supérieures de l'atmosphère. Leur temps de vie moyen, avant leur désintégration, est de 2,2 microsecondes, ce qui correspond à quelque 660 mètres (leur vitesse est proche de celle de la lumière). Mais ce « temps propre » est « dilaté » pour les observateurs terrestres, par rapport auxquels les muons arrivent à grande vitesse, ce qui explique que nous observons un flux très important de muons non désintégrés après un parcours de plusieurs kilomètres.

Il n'y a cependant rien à gagner pour un voyageur se déplaçant à grande vitesse : son temps de vie nous apparaît prolongé mais, pour lui, toutes ses fonctions sont affectées de manière identique. Du reste, pour lui, c'est *notre* temps propre qui apparaît comme s'écoulant plus lentement. Il n'y a cependant pas ici de contradiction, en raison précisément de la

nécessaire méthode de synchronisation des horloges : il n'existe en effet aucun moyen de savoir quel temps s'écoule « vraiment » plus lentement que l'autre, – ou plutôt cette question n'a tout simplement pas de sens pour le physicien : s'il n'existe pas de moyen de référer les deux observateurs à un temps « absolu », alors celui-ci n'a pas de sens physique, n'a pas d'existence physique.

D'autres conséquences directes de cette analyse sont la modification de la loi newtonienne d'addition des vitesses (puisqu'il faut qu'elle soit violée dans le cas des ondes électromagnétiques), la contraction des distances pour un observateur en mouvement, et enfin la célèbre relation d'équivalence entre la masse et l'énergie $E = mc^2$.

La Relativité restreinte, énoncée indépendamment et simultanément par Einstein et Poincaré en 1905, remet donc en cause nos « certitudes » concernant un espace et un temps absolus, – certitudes qui ont certes une base psychologique, peut-être innée et « évidente », mais qui se sont aussi construites depuis trois siècles sur la physique newtonienne. Un nouveau concept d'espace-temps apparaît, dont les propriétés apparaissent étranges, en même temps que s'évanouit la tentative kantienne de fonder la science sur les catégories *a priori* de l'esprit, notamment l'espace et le temps. Et alors que la conservation de la masse dans les transformations matérielles constitue une certitude scientifique depuis Lavoisier, le statut de la matière elle-même apparaît profondément modifié par la relation d'équivalence.

La théorie de la Relativité restreinte que nous venons d'évoquer utilise, nous l'avons dit, un outillage mathématique simple, mais elle mobilise une approche épistémologique dont découlent des conséquences révolutionnaires. Elle est en effet inséparable d'une analyse précise des pratiques scientifiques : le recours exclusif à l'expérience et à la mesure, au moyen d'un dispositif instrumental, et la formulation de lois énoncées sous forme mathématique.

Fondamentalement, cette approche est d'ailleurs celle qui, depuis Newton, caractérise la science moderne : « *Je n'imagine pas d'hypothèses – hypothèses non fingo. Car tout ce qui ne se déduit point des phénomènes est une hypothèse, et les hypothèses, soit métaphysiques, soit physiques, soit mécaniques, soit celles des qualités occultes, ne doivent pas être reçues dans la philosophie expérimentale* » (Isaac Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Scolie générale). Avec la Relativité restreinte, un pas de plus est cependant franchi dans le recours aux seules quantités observables, mesurables. Plus encore que Newton, le physicien relativiste se refuse à « dire la vérité » sur la nature, l'espace, le temps, à se prononcer sur leur identité supposée. Son objet est de formuler des théories quantitatives, conduisant à des prédictions mesurables. La « vérité » des théories physiques ne porte pas sur autre chose que leur adéquation à l'expérience, la « réalité » des objets de la physique est circonscrite aux dispositifs expérimentaux. Par ses théories mêmes, la physique met dans le monde de l'intelligibilité, et celle-ci tend à conférer à ses objets, en un certain sens, de la « réalité ». Mais ceci n'implique pas que les objets de la physique prétendent correspondre, refléter ou traduire « la » réalité de la nature.

En un effort titanesque, Einstein va, de 1907 à 1915, prolonger ces travaux en appliquant le principe de relativité non seulement aux mouvements à vitesse constante mais aussi aux mouvements quelconques. Le principe de Galilée selon lequel tous les corps tombent dans le vide à la même vitesse, et qui s'exprime par l'égalité de la masse inerte (qui s'oppose à un changement de mouvement en présence d'une force) et de la masse pesante (qui répond à l'attraction gravitationnelle), conduit Einstein à formuler une théorie de la gravitation vue comme une courbure de l'espace-temps lui-même. En 1919, profitant d'une éclipse solaire, l'astronome britannique Arthur Eddington met en évidence la déviation des rayons lumineux lors de leur passage près du Soleil, confirmant ainsi non seulement que la lumière « pèse » (selon la relation

$E = mc^2$), mais aussi que pour les rayons lumineux « le plus court chemin » suit les courbures de l'espace-temps, sculpté par la présence de matière.

Ces observations, par lesquelles un savant britannique confirme la théorie d'un savant berlinois au sortir de la terrible guerre de 1914-1918, font sensation. Et beaucoup trouvent bientôt dans le slogan « tout est relatif » confirmation de leurs incertitudes, dans une période troublée par les épreuves de la guerre, les espoirs et les craintes portés par la révolution soviétique, et l'évolution rapide du capitalisme. Au point que la théorie de la Relativité deviendra un élément essentiel de la culture du XXème siècle, bien au-delà des cercles scientifiques.

La mécanique quantique

La physique du XXème siècle est marquée par une autre révolution, au moins aussi importante que la révolution relativiste : la révolution quantique. La mécanique quantique nous propose en effet une vision du monde, tel qu'il se révèle à l'échelle atomique, radicalement différente de celle à laquelle nous sommes habitués dans le monde macroscopique.

A notre échelle, deux types d'objets physiques bien distincts peuvent transporter de l'énergie, selon des modes complètement différents :

- les corpuscules, localisés dans l'espace, dotés d'une masse, transportent l'énergie sous forme d'énergie cinétique ($E = 1/2 m v^2$) en se déplaçant à travers l'espace, et la transmettent lors de chocs ; ils forment l'objet essentiel de la pensée des fondateurs de la mécanique, Galilée, Descartes, Leibniz, Newton ;

- les ondes, qui peuvent s'étendre à l'espace entier, consistent en oscillations du milieu qui n'impliquent *pas* de transport de matière dans la direction de leur propagation (les ondes sonores qui frappent notre oreille correspondent à des variations locales de pression, et dans la salle de concert les molécules d'air oscillent autour de leur position sans être jetées vers nous par l'orchestre comme le seraient des corpuscules). Quand elles s'étendent dans l'espace à partir de sources différentes, les ondes ont la propriété de se superposer en chaque point, pour former des « interférences ». Depuis le début du XIXème siècle, on sait que la lumière est une onde parce que Thomas Young a pu observer des interférences lumineuses. A la fin des années 1880, Heinrich Hertz a montré que, conformément à la théorie de Maxwell, il existe des ondes électromagnétiques.

Mais dans le monde quantique, les objets de la physique se comportent toujours *à la fois* comme des ondes *et* des corpuscules. En un sens qu'il faudra préciser soigneusement, ils « sont » simultanément des ondes et des corpuscules.

Illustrons cette double nature, avant de passer aux enjeux épistémologiques.

(1) Considérons, dans une approche macroscopique, un dispositif lanceur de balles disposé à une certaine distance d'un mur percé d'une ouverture de diamètre approprié à la dimension des balles. Celles-ci s'accumulent droit derrière l'ouverture, chaque balle arrivant à un endroit bien localisé. Et si deux ouvertures séparées sont ménagées dans le mur, nous observons deux dépôts de balles séparés.

(2) Considérons maintenant un bassin rempli d'eau, séparé en deux compartiments par une cloison dans laquelle est ménagée une ouverture. Si une onde est entretenue à la surface de l'eau d'un côté de la cloison par un agitateur animé d'un mouvement vertical, cette onde se propage de l'autre côté comme si elle émanait de l'ouverture. Elle atteint ainsi des lieux qui ne sont pas situés sur la droite joignant la position de l'agitateur et celle de l'ouverture, contrairement à ce qui se passait pour les balles (ceci nous est familier dans le cas des ondes sonores : le son qui entre dans une pièce par une fenêtre ouverte est perceptible dans toute la pièce, et semble provenir de la

fenêtre). Si deux ouvertures sont ménagées, les deux réseaux d'ondes qui en émanent interfèrent, tantôt ajoutant leurs effets, tantôt les annulant mutuellement.

De même, si une source lumineuse est disposée devant une cloison opaque percée de deux très petits trous, on peut observer au microscope la présence alternée au-delà de la cloison de bandes d'ombre et de lumière, en des endroits qui ne se trouvent pas dans le prolongement de la droite joignant la source et les trous : la lumière se comporte comme une onde et connaît des phénomènes d'interférence (c'est l'expérience de Young).

Dans le cas macroscopique (où les effets liés à la double nature quantique des objets sont négligeables), les effets produits par l'émission de corpuscules (1) ou d'ondes (2) sont donc distincts.

Passons maintenant au cas quantique.

(3) En 1922, le physicien américain Arthur Compton montra que les rayons X, découverts de manière totalement inattendue par Wilhelm Röntgen en 1895 et dont la nature d'ondes électromagnétiques avait été montrée depuis, se comportent dans leur collision avec des électrons atomiques exactement comme s'il s'agissait du choc de boules de billard. Cette observation expérimentale venait couronner une évolution de 20 ans sur la nature « corpusculaire » de la lumière.

C'est en 1900, en effet, que Max Planck avait proposé une solution révolutionnaire à l'un des « petits nuages » de Kelvin, que la physique classique ne parvenait pas à expliquer : celui du spectre de rayonnement d'un corps, c'est-à-dire la distribution en fonction de la température des longueurs d'onde du rayonnement émis, qui passe d'une dominante infrarouge à une dominante rouge, jaune, ..., ultraviolette, à mesure que s'élève la température du corps. Planck avait montré que ce spectre ne peut s'expliquer que si l'on suppose que l'énergie portée par le rayonnement prend non pas des valeurs quelconques (comme on s'y attendrait en physique classique), mais doit nécessairement être le multiple d'une énergie « élémentaire » dépendant de la longueur d'onde. L'énergie de rayonnement apparaît ainsi composée de « quanta », de paquets séparés, discrets.

Cette hypothèse avait été reprise et élargie par Einstein pour expliquer en 1905 l'effet photoélectrique et en 1907 le comportement de la capacité calorifique de certains corps à basse température. L'hypothèse des quanta avait été portée largement à la connaissance du monde scientifique en 1911, lors du premier Conseil Solvay, consacré précisément à « La théorie du rayonnement et les quanta ». Niels Bohr l'avait à son tour invoquée en 1913 pour expliquer que les électrons en rotation autour des noyaux atomiques récemment découverts par Ernest Rutherford ne rayonnent pas continûment leur énergie, ce qui les ferait rapidement tomber sur le noyau. Et en 1917 Einstein avait finalement formulé de manière explicite l'hypothèse que la lumière est formée de corpuscules, bientôt baptisés « photons » – ceux-là mêmes que Compton avait reconnus en 1922.

Ainsi, les ondes électromagnétiques possèdent un aspect corpusculaire.

(4) Et à l'inverse, les corpuscules possèdent un aspect ondulatoire ! Cette hypothèse inouïe fut proposée en 1924 par Louis de Broglie, par symétrie en quelque sorte avec le cas de la lumière. Elle fut vérifiée dès 1926-1927 dans des expériences de diffraction des électrons, qui débouchèrent bientôt sur l'invention du microscope électronique.

De nos jours, de nombreuses expériences ont permis de vérifier la nature ondulatoire des corpuscules. Considérons par exemple une source émettrice d'électrons (ou de tout autre type de corpuscules : protons, neutrons, atomes, - ou photons !), disposée devant une cloison percée d'un petit trou ; un écran détecteur est situé au-delà de la cloison. Les électrons sont émis de manière bien séparée dans le temps, un nouvel électron n'étant envoyé que lorsque le précédent a atteint

l'écran détecteur. Sans surprise, l'impact de chaque électron marque une position déterminée sur l'écran, ainsi qu'il se doit pour des corpuscules localisés.

Ouvrons maintenant dans la cloison un second trou. De nouveau, l'écran détecte des impacts localisés – mais ceux-ci ne sont *pas* situés dans le prolongement des trous, comme ce serait le cas pour des corpuscules macroscopiques (les balles du cas 1) : les impacts observés sur l'écran se distribuent de manière à former progressivement des figures d'interférence, avec alternativement des régions comportant de nombreux impacts et des régions sans impacts ; on observe aussi des impacts dans l'ombre de la cloison, entre les deux trous. Ainsi, des électrons qui sont tous émis *exactement* dans les mêmes conditions viennent se disposer tantôt ici, tantôt là, y compris en des endroits éloignés de la direction de la source.

On l'a dit, à chaque électron correspond un impact localisé, comme pour un corpuscule. On est donc tenté de croire que chaque corpuscule suit une trajectoire déterminée, passe par l'un des trous, puis continue vers l'écran détecteur – même si sa trajectoire est un peu inattendue, puisque le corpuscule ne continue pas en ligne droite (mais on pourrait inventer pour ceci toutes sortes de raisons crédibles, liées par exemple aux parois du trou).

En fait, cependant, ce n'est *pas* ainsi que les choses se passent. La distribution des impacts sur l'écran détecteur n'est *pas la même* selon que les deux trous sont ouverts simultanément, ou qu'un seul des trous est ouvert à la fois alors que l'autre est fermé (et on peut d'ailleurs faire en sorte de décider de façon tout à fait aléatoire quel trou sera fermé pour le lancement de chaque électron). Plus précisément, la distribution des impacts, lorsque les deux trous sont ouverts simultanément, révèle les figures d'interférence caractéristiques d'une onde. Dans ce cas, on observe notamment l'absence d'impacts, en raison d'interférences destructives, en des points où par contre on observe des impacts quand les trous sont ouverts alternativement.

Les choses se passent donc comme si chaque corpuscule, lorsqu'il traverse la cloison, « savait » si l'autre ouverture est ouverte ou non, et modifiait sa trajectoire en fonction du cas. Ou plutôt comme si les corpuscules se « délocalisaient », pour passer *simultanément* par les deux trous, comme une onde s'étendant dans l'espace.

Dans le domaine microscopique, où se révèle la nature quantique de la matière, les ondes ont donc un comportement corpusculaire (3), et les corpuscules un comportement ondulatoire (4) – aussi troublante que soit cette observation pour les êtres macroscopiques que nous sommes, qui ne sommes pas sensibles dans la vie courante aux effets quantiques et n'apercevons pas cette double nature.

L'interprétation de ces résultats va mener à des affrontements mémorables entre les plus grands physiciens de la première moitié du XX^{ème} siècle et bouleverser une nouvelle fois notre compréhension de la nature et de la science.

Les affrontements portent sur l'interprétation de l'aspect ondulatoire des objets quantiques. En 1926, suivant l'intuition de de Broglie, Erwin Schrödinger avait proposé pour décrire les phénomènes quantiques, notamment l'émission de rayonnement par les atomes, l'*équation d'onde* qui porte son nom. De leur côté, les physiciens du « groupe de Copenhague » mené par Niels Bohr, avec Max Born, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli et d'autres physiciens de la jeune génération, travaillaient à construire une théorie quantique (la « mécanique des matrices ») apparemment toute différente. Appliquant les préceptes qu'Einstein avait suivis pour construire la théorie de la relativité, ils se refusaient à formuler des hypothèses sur d'éventuelles réalités sous-jacentes, et leur théorie ne portait que sur les quantités *observables*, à savoir les « sauts d'énergie » des électrons atomiques, effectués par « quanta ». Schrödinger résolut la crise en montrant bientôt que les deux théories étaient mathématiquement équivalentes. Cependant, le problème restait : quelle interprétation donner à l'« onde » quantique ?

Schrödinger avait d'abord pensé que son « onde » était de nature « matérielle », mais cette interprétation fut rapidement invalidée. Max Born montra que ce sur quoi porte l'équation de Schrödinger est non pas une onde de matière, mais une *onde de probabilité*. C'est la distribution *statistique* des impacts des électrons sur l'écran qui obéit à l'équation d'onde. Le monde quantique serait donc, selon Born, fondamentalement probabiliste. Cette interprétation trouva bientôt de nouveaux fondements dans les *relations d'incertitude* formulées par Heisenberg en 1927. Il découle de celles-ci que la notion même de trajectoire d'un objet quantique n'a pas de sens, sa position et sa vitesse ne pouvant être simultanément définies.

C'est ici que se situe la rupture épistémologique la plus vive de la physique du XX^{ème} siècle. L'interprétation « orthodoxe » de la mécanique quantique, celle du groupe de Copenhague – généralement acceptée aujourd'hui – implique en effet une révision radicale du déterminisme physique, du concept même de causalité, car elle prête au monde quantique un caractère probabiliste intrinsèque, indépassable, *irréductible*.

Cette interprétation provoqua chez Einstein – qui était pourtant l'un des pères des quanta – un rejet violent, une authentique révolte : « *Dieu ne joue pas aux dés !* ». « *S'il en était ainsi, j'aimerais mieux être cordonnier ou même employé dans un tripot que physicien* » écrivait-il à Max Born en 1924 à propos d'une première approche probabiliste des objets quantiques proposée par Bohr. Pendant des années, Einstein va essayer de montrer que le caractère probabiliste de la mécanique quantique serait dû à son caractère « incomplet ». Insistons ici sur le fait que la critique d'Einstein ne portait pas sur le caractère correct de la mécanique quantique, dont il acceptait qu'elle décrivait correctement le monde physique, mais sur sa prétention à être une théorie *complète*, alors que pour lui dont la dimension aléatoire de la théorie ne pouvait être dû qu'au fait que les objets qu'elle manipule ne décrivent pas *complètement* le monde. C'est l'objet en particulier de l'article qu'il publia avec deux collaborateurs en 1935 (le fameux article « EPR »), où il tentait d'ancrer sa démonstration de l'incomplétude de la mécanique quantique dans une définition de la « réalité » physique invoquant la permanence « ontologique » des objets physiques. Beaucoup de ceux qui sont mal à l'aise avec le caractère probabiliste de la mécanique quantique ont invoqué, après EPR, notre connaissance supposée « incomplète » du problème : des « variables cachées » seraient à l'œuvre, et le caractère statistique des phénomènes observés serait dû à notre ignorance de ces variables.

Ces interprétations ont été invalidées dans les années 1980. Le physicien John Bell ayant montré que la théorie quantique et celle des « variables cachées » menaient à des prédictions différentes pour certains phénomènes, les expériences menées notamment par Alain Aspect ont tranché en faveur de l'interprétation « orthodoxe » de la mécanique quantique, et écarté l'hypothèse des « variables cachées ».

La mécanique quantique n'invalidé évidemment pas toute causalité, tout déterminisme : la physique elle-même disparaîtrait si elle cessait d'être prédictive ! Et le monde contemporain démontre à chaque instant la puissance inouïe de la mécanique quantique, qui est à la base de la plupart des objets techniques récents. Mais la théorie quantique oblige à revisiter, à réinterroger en profondeur les notions de causalité et de réalité : c'est en ceci qu'on peut parler *révolution*. La mécanique quantique encadre de manière rigoureuse le champ d'activité du physicien. Comme pour le physicien newtonien, comme pour le physicien relativiste, elle sépare radicalement l'objet de la physique des spéculations sur la « réalité » : la physique porte sur la confrontation de prédictions théoriques avec des mesures réalisées par des instruments, mais ne se prononce *pas* sur la « réalité » de ses concepts ou des objets du monde extérieur, hors de l'expérience.

Prenons l'une des réactions les plus simples qu'étudie la physique des particules élémentaires : un électron et un proton entrent en collision, et l'on trouve dans l'état final un électron, un proton, et un photon supplémentaire. Pour calculer cette réaction banale, le physicien doit considérer que

deux processus sont à l'œuvre : l'électron rencontre d'abord le proton puis émet un photon, et l'électron commence par émettre un photon, puis rencontre le proton. Que se passe-t-il « réellement » dans chaque cas ? L'un des processus, ou l'autre ? Pour rendre compte de l'expérience, il faut considérer que, dans *chaque* cas, les *deux* processus se produisent *simultanément*, inséparablement – ils sont noués l'un à l'autre, ils « interfèrent », comme deux ondes interfèrent.

Pouvons-nous prétendre que l'électron qui a « spontanément » émis un photon soit encore « le même » que l'électron de départ ? et que l'électron de l'état final ? Cette ontologie a-t-elle du sens ?

Quant à l'interaction elle-même entre l'électron et le proton, elle se produit par l'échange d'un photon « virtuel » (le carré de sa masse est négatif, celle-ci est donc exprimée par un nombre imaginaire !) – et en outre, *simultanément*, par l'échange de deux photons, trois photons, etc. Où est la « réalité » ici ? La théorie quantique des champs, qui utilise les « diagrammes de Feynman » que nous venons d'évoquer, permet de calculer avec une très grande précision les résultats de l'expérience, mais elle ne se prononce pas sur ce qui s'est « vraiment », « réellement » passé pendant l'interaction. Celle-ci se déroule pendant un temps extrêmement court durant lequel, selon les relations d'incertitude de Heisenberg, les lois fondamentales de conservation de l'énergie et de l'impulsion peuvent être violées. A l'échelle quantique, vous avez le choix : utiliser les relations d'incertitude, violer la conservation de l'énergie, et travailler avec des particules qui possèdent leur « véritable » masse, ou préférer considérer plutôt que l'énergie et l'impulsion sont conservées durant le temps très bref de l'interaction, mais attribuer aux particules, pendant ces temps très courts, des masses dont le carré est négatif. L'important – et c'est le cas ! – est que les deux approches mathématiques donnent les mêmes prédictions pour les grandeurs observables, mesurables.

La mécanique quantique, et en particulier la physique nucléaire, la physique des particules, la physique de l'état solide nous conduisent donc à une nouvelle intelligibilité de la nature, différente de celle que nous suggérait la physique classique, y compris son extension relativiste. S'agit-il d'un appauvrissement ? D'une trahison ? La réalité a-t-elle fui entre nos doigts ? L'identité de la matière s'est-elle perdue ?

Certes, la mécanique quantique ne nous interdit pas d'aller « au-delà » de l'expérience : elle constitue une théorie à part entière, extraordinairement puissante. En tant que théorie, elle opère cependant sur des objets *théoriques*, qui ne sont pas donnés en tant que tels par l'expérience (ou « la nature »). L'un de ces objets théoriques se rapporte à un proton, un autre à un électron, et un autre type d'objet encore concerne l'interaction entre eux. Manipulés en accord avec la théorie, ces objets théoriques permettent la prédiction de résultats expérimentaux corrects. Mais quelle est la nature, la « réalité » de ces objets théoriques ? Quel est le type de réalité associé à un « proton » ou à un « photon virtuel » de la théorie ? Ces objets théoriques sont sans doute porteurs d'une *certaine* réalité, puisque nous parvenons à dialoguer efficacement avec la nature lorsque nous les manipulons. Mais en même temps, nous sommes tenus de ne les manipuler que dans le cadre que veut bien nous autoriser la théorie (ou « la nature » ?).

Tout dépassement par rapport à cette règle, toute dérive « réaliste » qui tenterait d'imposer au monde quantique les « évidences » du monde macroscopique mènent à des échecs. Par exemple, la conviction issue de notre vie quotidienne que les objets matériels en mouvement suivent une trajectoire bien déterminée. Ou encore, les hypothèses ontologiques portant sur la « réalité », l'unicité et la permanence des objets individuels lors de leurs interactions. Ou enfin l'application d'un « principe de causalité » que notre espèce (comme beaucoup d'autres espèces animales sans doute) a implicitement sélectionné historiquement pour pouvoir survivre au sein de la nature.

Venant après la révolution relativiste, ces nouvelles restrictions apportées au caractère de réalité des objets de la science, et tout particulièrement au principe de causalité, ne pouvaient manquer d'entraîner des répercussions considérables quant à la réflexion sur *ce qu'est* la science elle-même.

La révolution épistémologique

Avec le bouleversement de notions aussi fondamentales que celles d'espace, de temps, de matière, de causalité, il n'est pas étonnant que les révolutions de la physique du XX^{ème} siècle aient suscité des réflexions et des questionnements sur le statut, la nature et les pratiques de la science elle-même.

Comment la science peut-elle en effet s'accommoder de révolutions aussi radicales ? Peut-on dire, et en quel sens, que la théorie de Newton était « fausse » ? Mais comment juger si la théorie d'Einstein est « vraie » alors que celle de Newton serait « fausse » ? Ou juger que celle d'Einstein est « plus vraie » que celle de Newton ? Comment évaluer la « supériorité » d'une théorie sur une autre ? Peut-on encore parler de « progrès scientifique », si on doit y intégrer de telles « révolutions » ?

Les philosophes de la première moitié du XX^{ème} siècle, les penseurs du « Cercle de Vienne », Karl Popper ont travaillé en profondeur ces questions, le plus souvent à la lumière de l'histoire de la physique. Popper en particulier a été conduit à rejeter l'idée qu'une théorie scientifique puisse être « prouvée », « vérifiée », mais il a fait ressortir que ce qui caractérise la science parmi les autres savoirs humains, c'est qu'un énoncé scientifique doit être « falsifiable », que tout énoncé scientifique doit s'exposer au risque de l'expérience, et doit donc potentiellement pouvoir être invalidé par celle-ci.

Pour leur part, Gaston Bachelard et Thomas Kuhn ont donné, dans le récit de l'histoire de la science, une place centrale aux notions de « rupture épistémologique » et de « révolution scientifique ». Après une révolution scientifique, d'une certaine manière, « tout est différent » dans le monde de la science. Nous ne pouvons plus voir l'espace, le temps, la matière, la causalité, les notions d'onde ou de corpuscule, la science elle-même comme au XIX^{ème} siècle.

Les révolution scientifiques mettent-elles pour autant à bas tous les anciens résultats ? Le vrai devient-il faux et le faux devient-il vrai ? Loin de là : l'immense majorité des anciens résultats restent vrais, même si leur sphère de validité se trouve éventuellement précisée. Ce qui a changé, c'est le regard des scientifiques, leur *vision du monde*, la perspective dans laquelle sont intégrés les anciens résultats. Non seulement d'immenses territoires nouveaux se sont ouverts dans la physique du XX^{ème} siècle (dans le monde atomique et nucléaire, en astrophysique et en cosmologie, dans la physique de la matière condensée et des nanotechnologies, etc.), mais *le regard* sur les anciens territoires s'est transformé : se trouvant intégrés dans la nouvelle vision du monde, ils en sont en un certain sens modifiés. Ruptures, révolutions, donc. Mais pas de « table rase ».

Comment un tel changement révolutionnaire de la vision du monde survient-il ? Comment la nouvelle science en vient-elle à supplanter l'ancienne ? Il serait naïf de croire que puissent exister, pour une activité aussi complexe que la science, des critères simples, objectifs, mécaniques. Kuhn souligne le rôle d'« anomalies », qui rappellent les « petits nuages » de Kelvin, que certains scientifiques peuvent prendre suffisamment au sérieux pour proposer des approches nouvelles qui après coup apparaîtront comme révolutionnaires – si du moins elles sont couronnées de succès. D'autres scientifiques tentent au contraire d'en rendre compte dans le cadre de l'« ancienne » science, au moyen d'aménagements localisés, ou remettent à plus tard l'élucidation de l'énigme. Et cette attitude est elle aussi justifiée : le corpus scientifique possède une telle puissance, il s'est construit en rendant adéquatement compte d'une telle multitude de phénomènes, qu'il ne peut être écarté à la légère pour tenter de rendre

compte de manière « révolutionnaire » de toute petite anomalie. Et pour sa part, le nouveau « paradigme » doit lui aussi « faire ses preuves »...

En fait, paradoxalement, la science est une entreprise conservatrice par nature qui – en raison de son efficacité même – vise à conserver précieusement ses acquis. Elle ne cède au changement qu'en dernier recours, lorsqu'il s'impose irrésistiblement. C'est ce qui fait aussi de la science sans doute l'entreprise humaine la plus révolutionnaire !

Mais qui décide que « le changement s'impose irrésistiblement », que le nouveau paradigme est victorieux, qu'il doit remplacer l'ancien ? C'est évidemment *la communauté scientifique* elle-même. Depuis l'émergence en Occident de la science moderne et des Lumières, aucune autre instance n'est habilitée à se prononcer sur le statut de la connaissance scientifique.

Or la conviction de la communauté scientifique dépend de très nombreux facteurs : les arguments scientifiques échangés de part et d'autre, évidemment – sans eux, même pas de débat. Egaleme nt la cohérence, la pertinence de la nouvelle théorie, et aussi des considérations plus subjectives, comme des jugements sur sa puissance et sa fertilité supposées. Enfin, des considérations sur des qualités aussi peu « scientifiques » que l'élégance, la simplicité ou le caractère « naturel » de la théorie. De tels « arguments » sont omniprésents dans la recherche en train de se faire – puis s'évanouissent une fois la théorie solidifiée, le nouveau paradigme admis, une nouvelle « science normale » établie. En outre, comme toute communauté humaine, la communauté scientifique est traversée de conflits (de génération, d'intérêts, d'ambition), de hiérarchies (pouvoir académique, accès aux ressources financières, âge, prestige), de tensions de toutes sortes (entre disciplines, entre traditions de pensée, entre nations, entre institutions) – toute une sociologie est à l'œuvre ici.

Dès lors que l'on reconnaît aussi, dans la construction de la science, le rôle de la communauté scientifique, une révolution épistémologique se profile.

Pour simplifier, deux voies de pensée s'ouvrent :

- pour l'une, la communauté scientifique serait essentiellement l'instrument plus ou moins aveugle de la Science en train de se découvrir elle-même. Vision hégélienne, grandiose et héroïque, qui fut longtemps celle de l'histoire des sciences (ou comme on disait volontiers « histoire de *la science* ») : les Grands Hommes de la Science sont les artisans modestes et dévoués du dévoilement graduel de la Vérité. Dans cette histoire linéaire, progressive, en réalité pré-écrite, les lenteurs et les errements sont dus à des insuffisances techniques et instrumentales, à la force des habitudes et des préjugés, ou encore à l'influence perturbatrice des tensions sociales ;

- d'autre part, la communauté scientifique peut se voir attribuer dans l'histoire de la science un rôle *constructif*, avec un degré d'autonomie plus ou moins large – à l'intérieur naturellement des contraintes fixées par l'expérimentation et le verdict de cette instance extérieure que nous appelons « la nature ». On aurait affaire ici, plutôt qu'à une évolution linéaire, à une croissance buissonnante dans l'ouverture des territoires de recherche, des modes de pensée, des priorités, des centres d'intérêt, des critères même de cohérence et de vérité.

Dans cette approche, ceux qui ont eu tort face aux nouvelles idées, les « vaincus » de l'histoire de la science ne sont pas nécessairement ravalés au rang de simples « obscurantistes » opposés au progrès, ou de faire-valoir pour les vainqueurs – ici, les « vaincus » se voient également reconnu un rôle constructif dans la science qui se forge. Que l'on pense au rôle d'Einstein dans l'interprétation de la mécanique quantique. Avec affection et respect, Bohr reconnaîtra que ses critiques ont contribué à préciser, à affiner les concepts de

la théorie. L'article EPR par exemple pose avec précision la question de la non-localité de la fonction d'onde, et les questionnements d'Einstein continuent à nourrir la réflexion sur l'interprétation à donner à la théorie quantique.

Indubitablement, les révolutions de la physique du XX^{ème} siècle ont été l'un des facteurs qui ont conduit à reconnaître l'importance du rôle des communautés scientifiques dans la définition de la science, de ses contenus et de ses pratiques. En outre, le développement de la sociologie et de l'anthropologie ont conduit naturellement à s'intéresser à cette communauté particulière. Et surtout, la place centrale occupée dans la société contemporaine par la science et la technologie, la problématique de leur gestion politique, militaire et économique, devaient naturellement mener à une approche de la science qui prenne davantage en compte les dimensions sociales dans son développement même.

La science s'est ainsi trouvée objet d'étude non seulement philosophique et épistémologique, mais sociologique et politique. Certains sociologues ont sans doute poussé trop loin une approche des relations entre scientifiques qui se résumerait à des rapports de forces et de pouvoirs, faisant trop abstraction dans les relations entre chercheurs des contenus scientifiques eux-mêmes et éliminant ainsi une instance, la nature, par rapport à laquelle les chercheurs se définissent toujours en fin de compte. Il n'en reste pas moins que, compte tenu de son importance sociale, il soit tout à fait légitime et instructif d'utiliser l'outil de la recherche sociologique et anthropologique pour mieux comprendre le fonctionnement complexe de la science.

Certains semblent voir ici le signe d'une « dérive ». Ils interprètent la reconnaissance de cette dimension sociologique de la science comme un abandon de la référence à la vérité scientifique, la porte ouverte à l'irrationalisme, au relativisme et à un « post-modernisme » qui trahirait l'héritage des Lumières.

Indubitablement, avec ces nouveaux outils, ces nouvelles recherches, « *l'identité* » de la science s'est complexifiée, affinée, enrichie. Il ne m'apparaît pas qu'il y ait là lieu à déplorer une « *perte de repères* », une « *dérive* » qui doive nous inquiéter.

La science reste une aventure admirable, l'une des plus riches de celles qu'a entreprises l'humanité, dans un effort collectif.

Seul un regard lucide, tant sur ses contenus de savoir que sur son fonctionnement et sur ses pratiques, peut assurer qu'elle continue de jouer le rôle émancipateur que lui prêtaient les Lumières.

Quelques ouvrages d'introduction

Henri Poincaré, *La Science et l'Hypothèse*, coll. Champs, Flammarion

Henri Poincaré, *La Valeur de la Science*, coll. Champs, Flammarion

Albert Einstein, *Conceptions scientifiques*, coll. Champs, Flammarion

Albert Einstein, *Physique, philosophie, politique*, introduction et notes de Françoise Balibar, coll. Points-Sciences, Le Seuil

Niels Bohr, *Physique atomique et Connaissance humaine*, introduction et notes de Catherine Chevalley, coll. Folio-Essais, Gallimard
Werner Heisenberg, *La Partie et le Tout*, coll. Champs, Flammarion
Thomas Kuhn, *La Structure des Révolutions scientifiques*, coll. Champs, Flammarion
Dominique Pestre, *Introduction aux « Science Studies »*, coll. Repères, La Découverte