



LE VIRTUEL ET LE POSSIBLE

DISCOURS PRONONCE PAR

M. Serge HAROCHE

Délégué de l'Académie des sciences

Comme nous le constatons aujourd'hui, on peut aborder le virtuel avec l'approche du financier, de l'architecte, de l'écrivain ou du philosophe. Je voudrais quant à moi parler du rôle fondamental que joue ce concept pour le physicien. Passons sur un aspect évident de la question. Le virtuel a envahi notre vie par l'intermédiaire d'écrans reproduisant la réalité, ou par le truchement de réseaux permettant la création de communautés d'internautes évoluant dans un monde artificiel. Ce virtuel-là est une conséquence des avancées de la science, du développement d'ordinateurs et de systèmes de communication rapides et puissants. Il y aurait beaucoup à en dire, peut-être plus en anthropologie qu'en physique, tant sont importants les effets qu'il induit sur notre façon d'appréhender le monde. Mais ce n'est pas de cela dont je parlerai. Je m'intéresserai au virtuel non pas comme conséquence de la science, mais plutôt comme élément constitutif essentiel de la démarche scientifique.

Commençons par un premier sens du mot. Est virtuel ce qui n'existe encore qu'en puissance. La science qui cherche parmi les possibles explications du monde celle qui correspond à la réalité des observations est naturellement amenée à envisager des entités potentielles dont certaines finissent par accéder au statut du réel, alors que d'autres disparaissent parce qu'infirmeries par l'expérience. L'atome en est un exemple éclatant. Envisagé par les philosophes dès l'antiquité, il est entré dans le débat scientifique au XIX^e siècle comme une entité permettant d'expliquer des phénomènes aussi divers que les réactions chimiques et les propriétés des gaz. Mais l'atome était-il réel ou simplement un concept commode auquel on pouvait trouver une alternative ? Pendant longtemps, les scientifiques se sont opposés à ce sujet. Les atomes ne se sont imposés qu'au début du XX^e siècle, lorsque les preuves de leur existence sont devenues si convaincantes que les reléguer au domaine du virtuel est apparu comme un artifice encombrant. Aujourd'hui, physiciens, chimistes et biologistes observent et manipulent des atomes et des molécules isolés et ce débat est clos.

D'autres entités introduites pour expliquer la structure de la matière ont connu une histoire analogue. Même un non-scientifique a entendu parler de l'antimatière, dont l'antiélectron ou positron a été le premier exemple. Cette particule miroir de

l'électron, qui lui est identique au signe de sa charge près, a émergé sous une forme virtuelle des équations de la théorie quantique relativiste de l'électron, avant d'être réellement observée. D'autres concepts n'ont pas eu cette chance et leur virtualité n'a pas résisté à l'épreuve de l'expérience. C'est le cas de l'éther, milieu hypothétique dans lequel les ondes lumineuses étaient censées se propager avant que la fameuse expérience de Michelson ne lui porte un coup fatal.

Pour trancher entre virtuel et réel, l'expérience est donc essentielle. L'accélérateur de particules du CERN, le Large Hadron Collider ou LHC, a été conçu pour tenter de faire passer du virtuel au réel l'hypothétique boson de Higgs, particule dont l'existence serait la clé de voûte de notre système explicatif du monde, répondant à la question quasi métaphysique de savoir comment les particules ont acquis leur masse. Les efforts gigantesques, financiers, intellectuels et technologiques investis dans cette recherche montrent combien nous attachons d'importance à distinguer le virtuel du réel!

Un autre exemple en est donné par les astrophysiciens qui cherchent à percer le mystère de la masse manquante dont l'existence est avancée comme explication possible d'observations astronomiques qui ne collent pas avec la répartition des masses connues dans l'Univers. Cette recherche rappelle celle de la planète manquante, que les calculs de Le Verrier et d'Adams attribuaient aux perturbations observées de l'orbite d'Uranus. Cette planète, baptisée Neptune, est passée du virtuel au réel en quelques mois, le temps pour l'astronome Galle de pointer sa lunette dans la région du ciel indiquée par Le Verrier. Les astrophysiciens d'aujourd'hui, dans leur longue quête de la masse manquante, doivent envier cette rapidité.

Le concept le plus virtuel à ce jour est sans doute celui des super cordes, éléments hypothétiques constituants ultimes de la matière dont la taille serait des milliards de milliards de fois inférieure à celle d'un noyau atomique ! Ces lignes élémentaires minuscules dont les vibrations sont censées décrire l'ensemble des particules constituant la matière sont si petites qu'aucun accélérateur de particules ne saurait les mettre directement en évidence. Sont-elles destinées à rester éternellement virtuelles ou peut-on espérer déceler un jour les effets de leur existence ? Je reviendrai plus loin sur ce point crucial.

La physique ne s'attache pas seulement à décrire la structure des systèmes, depuis l'échelle subatomique, jusqu'aux dimensions de l'Univers. Elle doit également rendre compte des lois de leur évolution. Là encore, la distinction entre réel et virtuel est essentielle. Considérez un rayon lumineux se propageant d'un point à un autre. Quel chemin va-t-il prendre ? Un principe fondamental de l'optique, dû à Fermat, nous dit que le chemin suivi est celui qui rend minimal le temps de propagation entre les

deux points. Si le milieu transparent est homogène, le chemin de temps minimal est évidemment le plus court, la ligne droite entre les deux points. Si par contre le rayon lumineux parcourt un milieu inhomogène, où la vitesse de la lumière varie, le chemin de temps minimal sera courbe, favorisant une trajectoire plus longue dans la région où la lumière va plus vite. L'inflexion des rayons lumineux dans un milieu formé de strates d'air chaud où la vitesse de la lumière est grande et d'air plus froid où elle se propage plus lentement donne naissance aux mirages, objets virtuels par excellence, dont l'apparition est une conséquence directe du principe de Fermat. Mais que signifie au juste ce principe ? Si la lumière choisit le chemin de temps le plus court, c'est que d'une certaine façon, elle est capable de le comparer aux autres chemins possibles qu'elle ne suit en quelque sorte que de façon virtuelle. Bien sûr, cette comparaison n'a rien d'anthropomorphique. Il ne s'agit que d'une propriété mathématique des équations de propagation des ondes lumineuses.

De même, le chemin suivi par une particule matérielle entre deux points est celui qui minimise non plus le temps de parcours, mais une autre quantité, appelée l'action. Parmi tous les chemins virtuels possibles, est réellement suivi celui le long duquel l'action est minimale. Ce principe, dû à Maupertuis, conduit à une formulation de la mécanique équivalente à celle des lois de Newton. Cette notion de virtuel opposé au réel est indissociable du fait que les processus de la nature obéissent à des lois mathématiques exprimant des relations entre des formes, ici des trajectoires de particules. Parmi ces formes, certaines correspondent au phénomène réel et les autres à des phénomènes virtuels, non réalisés, mais dont la prise en compte mathématique est essentielle pour déterminer ce qui se passe réellement.

Comment la Nature choisit-elle entre les chemins virtuels celui bien réel qu'elle suit ? A cette question apparemment naïve, la physique quantique apporte une réponse qui donne à la notion de processus virtuel une signification profonde. La matière, comme le rayonnement, possède à la fois des propriétés ondulatoires et corpusculaires. La lumière, classiquement considérée comme une onde, est aussi formée de grains élémentaires, les photons dont les rayons lumineux sont les trajectoires. De même, les constituants de la matière sont à la fois des particules et des ondes, les fameuses ondes postulées par Louis de Broglie en 1923. Alors que des particules classiques sont bien localisées, les ondes sont partout à la fois, occupant virtuellement tout l'espace où elles peuvent se propager. La longueur d'onde, la distance qui sépare deux crêtes successives de l'onde de matière à un instant donné, est d'autant plus petite que la masse de la particule et sa vitesse sont plus grandes.

Comment concilier ces deux notions apparemment contradictoires d'onde et de particule ? Considérez l'événement suivant : une particule passant à un instant

donné en un point matérialisé par un trou dans un écran se trouve, un instant plus tard en un autre point, où elle traverse un autre diaphragme percé dans un autre écran. Comment s'est-elle propagée entretemps ? Si c'est une onde, elle va être partout à la fois, apparaissant comme une somme d'ondelettes dont les phases varient rapidement le long des différentes trajectoires virtuelles que l'on peut imaginer entre les deux trous. Une propriété essentielle des ondes est leur capacité à se combiner, à interférer. Des ondelettes de phases différentes se brouillent, annulent leurs amplitudes en certains points et les ajoutent, les renforcent en d'autres points. Si la particule est classique, parce que assez massive ou rapide, les ondelettes associées, de très courte longueur d'onde, interfèrent de façon destructive dès que la trajectoire s'écarte du chemin réel d'action minimale. Le long des trajectoires virtuelles, les phases se brouillent, l'intensité des ondes devient négligeable, tout comme la probabilité de trouver la particule en ces points. On retrouve ainsi le principe de Maupertuis.

Qu'advient-il maintenant si la particule est très légère et que sa longueur d'onde devient comparable à la taille des trous délimitant sa trajectoire ? Les phases des chemins virtuels se brouillent moins et la particule commence à apparaître en des points interdits par les lois de la physique classique. On observe ainsi des phénomènes de diffraction et d'interférence d'ondes de matière avec des électrons, particules subatomiques très légères, ou même avec des atomes très lents, refroidis par interaction avec de la lumière laser. Cette physique des atomes froids connaît actuellement un grand développement. Elle étudie, en un sens, le comportement de la matière hors de la trajectoire balisée de la physique Newtonienne, le long de chemins que la physique classique considère comme virtuels.

Ces principes se généralisent à d'autres phénomènes en physique microscopique. Intéressons-nous par exemple à la force d'interaction entre deux atomes. Comprendre la nature de cette force est essentiel pour la chimie et la biologie puisque c'est elle qui conditionne la liaison des atomes entre eux et qui explique la structure de la matière, inerte ou vivante. La physique quantique en donne l'interprétation suivante. Un des deux atomes émet un photon qui se propage jusqu'à l'autre qui l'absorbe. Puis le second atome rend au premier un photon par un processus inverse. La force entre les atomes résulte de cette sorte de jeu de ping-pong dans lequel les deux atomes échangent des grains de lumière. Pour calculer cette force, il faut sommer les contributions de processus correspondant à toutes les énergies possibles des photons échangés, tout comme il faut pour comprendre la propagation d'une particule entre deux points tenir compte de tous les chemins virtuels possibles menant de l'un à l'autre.

Ce qui rend étrange cette transaction entre les atomes c'est que l'énergie globale n'est pas conservée dans ses étapes intermédiaires, en violation d'une loi fondamentale

de la physique classique. Le premier atome n'a pas l'énergie nécessaire pour créer un photon. Il faut en quelque sorte qu'il emprunte cette énergie qui se trouve restituée dans l'état final, lorsque le second atome le lui a renvoyé. Cet emprunt d'énergie est permis dans le monde quantique à condition qu'il dure un temps d'autant plus court que la quantité d'énergie empruntée est plus grande. La situation n'est finalement pas si différente de celle rencontrée en économie. On ne peut emprunter que jusqu'à un certain niveau dépendant de la durée du prêt et il faut toujours, *in fine*, que les comptes soient équilibrés. Les photons, de masse nulle, peuvent avoir une énergie très faible et donc cet emprunt d'énergie peut durer relativement longtemps, permettant à des atomes éloignés de plusieurs fois leur taille d'interagir. Ce processus d'échange est dit virtuel car les photons intermédiaires ne sont pas réellement observables. Ils correspondent à une étape du calcul mathématique par lequel on évalue la force interatomique.

A l'intérieur du noyau des atomes, les protons et les neutrons interagissent par des forces dites d'interaction forte à l'origine de l'énergie nucléaire, qui sont beaucoup plus grandes que les forces interatomiques de la chimie, mais de beaucoup plus courte portée. Le physicien japonais Yukawa a fait dans les années 1930 l'hypothèse que ces forces étaient le résultat de processus virtuels d'échange de particules massives qu'il a appelées mésons. Connaissant la portée de ces forces, il a prédit l'ordre de grandeur de la masse de ces mésons, dont la découverte, dans des rayons cosmiques a confirmé l'existence. Cette histoire illustre deux sens du mot virtuel. La considération de processus quantiques virtuels a permis l'émergence d'une particule nouvelle, virtuelle, jusqu'à ce que l'expérience lui confère le statut du réel.

Les processus virtuels à l'origine des forces entre particules modifient également leurs propriétés intrinsèques. Un atome, entouré d'un nuage de photons virtuels qu'il émet et réabsorbe continûment voit son énergie légèrement changée. Des observations spectroscopiques précises ont permis de mesurer cette modification et ont ainsi mis en évidence les effets bien réels de ces processus virtuels. D'autres processus virtuels prédits par certaines théories, dont celle des super cordes, devraient produire des effets analogues, dont l'observation pourrait apporter une preuve indirecte de l'existence de particules nouvelles trop massives pour être réellement produites par le LHC.

La physique quantique peut donner un autre sens, encore plus étonnant, à la notion du virtuel. Une mesure résulte toujours de l'interaction du système mesuré avec l'appareil qui l'observe. Alors qu'en physique classique, cette interaction révèle l'état du système sans le perturber, en physique quantique l'interaction avec l'appareil de mesure produit une perturbation incontrôlable et conduit à un résultat de mesure aléatoire, la théorie ne permettant que de prévoir sa probabilité. Ce caractère intrinsèquement

probabiliste de la physique quantique rompt avec le dogme du déterminisme absolu, énoncé par Laplace comme une conséquence des lois de Newton. Bien qu'il ait bouleversé les conceptions Newtoniennes par sa théorie de la relativité, Einstein n'a jamais accepté de renoncer au déterminisme classique. Pour lui, Dieu ne pouvait jouer aux dés avec le monde. Les physiciens quantiques plus radicaux, emmenés par Bohr et son école de Copenhague, se sont affranchis de cette conception et ont établi les règles du calcul de probabilité régissant ces jeux quantiques de la Nature, règles que toutes les expériences ont confirmé à ce jour avec précision.

Imaginons un de ces jeux. Un atome présentant un aspect ondulatoire marqué passe à la fois par deux trous rapprochés percés dans un écran. Il est alors dans une superposition de deux états. Si on cherche à mesurer sa position, on le trouvera aléatoirement passer par un trou ou par l'autre mais, au grand dam d'Einstein, rien ne permettra, avant la mesure, de prédire dans quel trou on va le trouver. Envisageons, en suivant la fameuse parabole de Schrödinger, que cet atome, localisé en deux points à la fois, soit utilisé dans un dispositif léthal pour un chat. Si l'atome passe par un des trous, un détecteur déclenche une arme tuant le chat, alors que s'il passe par l'autre trou, rien ne se passe et le chat reste vivant. Si l'atome est une onde passant par les deux trous à la fois, on doit admettre que le chat de Schrödinger est, avant observation, suspendu entre la vie et la mort et cette superposition étrange doit donner lieu à des phénomènes d'interférence quantique. De telles expériences ont été réalisées non pas avec des chats réels, mais avec des ersatz de chats, petits systèmes constitués de quelques particules, et les prédictions de la physique quantique ont été vérifiées sur ces systèmes.

Je ne parle ici de ces expériences que parce qu'elles nous permettent d'introduire, pour interpréter la mesure, le point de vue des multi-univers, proposé dans les années 1950 par le physicien Everett, qui était choqué que le sort du chat soit décidé de façon aléatoire. Pour échapper à cette conclusion, il a imaginé que chaque mesure est une bifurcation dans un espace des possibles, que le chat et l'observateur se retrouvent à la fois dans deux mondes différents, celui où le chat est vivant et l'observateur conscient de voir un animal en vie, et celui où le chat est mort et l'expérimentateur désolé d'observer ce tragique résultat. Si l'on est dans la peau de celui qui voit le chat vivant, on se trouve complètement déconnecté du monde parallèle où l'autre éventualité est réalisée. Rien ne nous permet de dire si cet autre monde existe, et en ce sens il est virtuel. Etant donné le nombre de mesures quantiques qui se produisent autour de nous à chaque instant, chacune conduisant suivant cette interprétation à une bifurcation entre différents mondes possibles, le nombre d'univers ainsi généré donne un vertige bien plus grand que celui produit par la nouvelle de Borgès du «Jardin des sentiers qui bifurquent». En ce qui concerne les prédictions que l'on peut faire sur les mesures,

l'approche des multi-univers est cependant en tout point équivalente à celle de l'école de Copenhague. Si elle est réconfortante pour d'aucuns, car elle évite d'une certaine façon l'indéterminisme absolu, elle est vue cependant par la plupart des physiciens comme un jeu bien peu économique en terme de représentation du monde.

Cette exploration du virtuel en physique nous a conduits au-delà du point où beaucoup de physiciens aimeraient s'aventurer. Pour aller plus loin encore, je conclurai en disant que les univers parallèles peuvent être envisagés pour des raisons autres que la recherche d'une interprétation de la mesure quantique. Ils sont une riche source d'inspiration pour certains cosmologistes se laissant aller à des spéculations proches de la science-fiction. Des variantes de la théorie du bigbang suggèrent par exemple que des univers disjoints coexisteraient dans des bulles d'espace-temps séparées ne pouvant communiquer entre elles. Les constantes fondamentales de la nature prendraient des valeurs différentes dans ces univers disjoints, ne réalisant que dans certains d'entre eux, et par pur hasard, les conditions compatibles avec l'émergence de la vie. Cette idée séduisante permet d'éviter de donner une explication anthropique à notre existence, en lui conférant une interprétation quasi tautologique : comme nous ne pouvons-nous trouver que dans le monde dont les constantes fondamentales sont ajustées pour rendre notre existence possible, nous n'avons pas plus à nous en étonner que le gagnant à la loterie n'a à chercher une explication surnaturelle à sa bonne fortune. Mais là je m'égare franchement. Rien ne permettra sans doute jamais de tester la réalité de cette virtualité-là.