

ment obtenir une mesure? Cette question est légitime en mécanique classique, quand on décrit le mouvement des ballons de football, des planètes ou, plus généralement, des objets assez gros ; mais il en va autrement en mécanique quantique : au royaume des électrons, des photons et des autres particules subatomiques, des mesures sans interaction sont possibles quand on utilise des effets inédits et des systèmes expérimentaux bien conçus. Armé de physique quantique, Persée aurait pu trouver un moyen de «voir» Méduse sans aucune lumière provenant de la Gorgone ; il aurait pu voir sans regarder.

Des détecteurs quantiques qui mesureraient ainsi sans interaction auraient de nombreuses utilisations dans la vie quotidienne, mais ce sont surtout les conséquences philosophiques de leur fonctionnement qui sont intéressantes. Elles s'évaluent mieux grâce à des expériences de pensée, c'est-à-dire des analyses qui envisagent les résultats d'expériences qu'on ne cherche pas à réaliser en pratique.

Imaginons une variation du jeu de bonneteau, avec deux coquilles de noix et un cailloux caché sous l'une d'elles. Le caillou est spécial : il est réduit en poussière par la lumière. Le jeu consiste à chercher l'emplacement du caillou sans soulever les coquilles, et en lui évitant toute perturbation ; si le caillou est réduit en poussière, le joueur perd la partie.

Il semble impossible de gagner à tout coup, mais on gagne un coup sur deux si l'on soulève la coquille supposée ne pas contenir le caillou : si rien n'apparaît, alors le caillou se trouve sous l'autre coquille ; si un peu de poussière est présente, c'est que le caillou s'y trouvait.

Poursuivons notre modification du jeu en le simplifiant, de sorte qu'un joueur limité aux lois de la physique classique ne puisse plus gagner : nous ne conservons qu'une seule coquille, et une chance sur deux que le caillou soit dessous. Le but du jeu est de dire si le caillou est présent, toujours sans l'exposer à la lumière.

Supposons qu'il y a un caillou sous la coquille. Si le joueur ne regarde pas sous la coquille, il n'obtient pas d'information. S'il regarde, alors il sait que le caillou était là, mais, comme il l'a exposé à la lumière, il ne retrouve qu'un tas de poussière. Pourrait-on diminuer l'éclairement, de sorte que la lumière

qui atteint le caillou soit minimale? Pour voir quelque chose, il faut au minimum un photon.

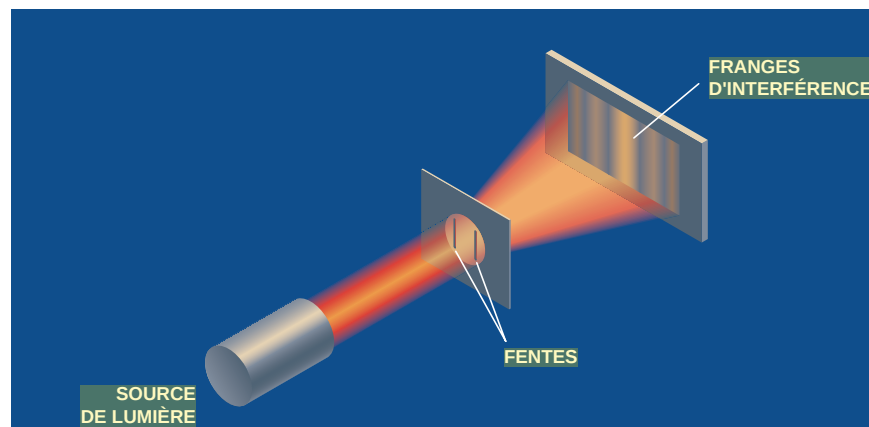
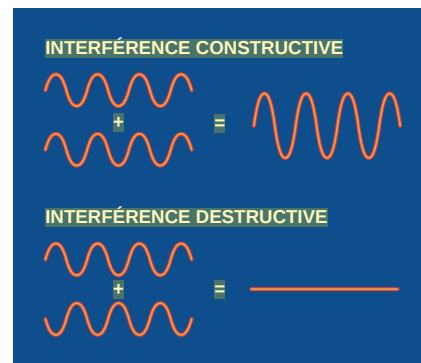
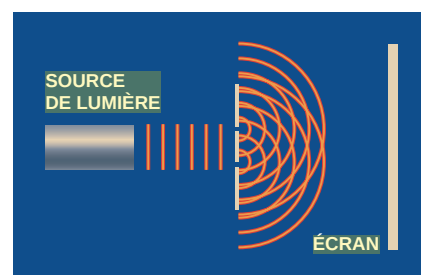
Elitzur, Vaidman et la bombe

Avec un caillou, le jeu n'a pas de conséquences dramatiques, mais, à l'Université de Tel Aviv, C. Elitzur et Lev Vaidman ont proposé un problème équivalent, où le caillou serait remplacé par une bombe qui exploserait en recevant le moindre photon, quelle que soit son énergie. Comment déterminer alors si la bombe se trouve sous une coquille?

C. Elitzur et L. Vaidman ont trouvé une solution qui ne donne un bon résultat qu'une fois sur deux, mais qui a montré qu'il existe un espoir de gagner un jour. Nous avons mentionné que la lumière est constituée de photons, mais, dans certaines circonstances, elle présente des propriétés purement ondulatoires et, notamment, peut former des interférences. Ces dernières se forment quand deux ondes se rencontrent dans une même partie de l'espace. Par exemple, dans l'expérience des fentes d'Young, la lumière traverse simultanément deux fentes parallèles, avant d'atteindre un écran situé derrière les fentes. Sur l'écran, les interférences se présentent sous la forme de raies alternativement sombres et claires (voir la figure 2). Les raies claires correspondent à des zones où les creux et les crêtes de la lumière provenant d'une fente se superposent respectivement aux crêtes et aux creux de la lumière provenant de l'autre fente. Les raies sombres correspondent à

des interférences destructives, où les crêtes de l'une des ondes se superposent aux creux de l'autre, et *vice versa*. Autrement dit, les raies claires correspondent à des zones de l'écran que les photons ont de fortes probabilités de frapper, et les bandes sombres de faibles probabilités.

La mécanique quantique montre que des interférences apparaissent lorsqu'un événement peut se produire de plus d'une façon, si ces façons sont indiscernables (cette définition de l'interférence est plus générale que celles qui sont généralement données dans les manuels). Dans l'expérience d'Young, la lumière a deux façons d'atteindre l'écran (elle peut passer par la fente supérieure ou par la fente inférieure), et on ne cherche pas à savoir



2. DES INTERFÉRENCES apparaissent lorsqu'un rayon laser traverse un écran percé de deux fentes : derrière l'écran, des ondes concentriques interfèrent (en haut). Ces ondes peuvent s'ajouter de façon constructive ou destructive (au milieu), engendrant une figure d'interférence composée d'une alternance de bandes sombres et claires (en bas).

quel photon passe par quelle fente. Si nous cherchions à savoir par quelle fente est passé un photon, les photons se répartiraient en tous points de l'écran, et les interférences n'apparaîtraient pas.

Dans leur expérience de pensée, C. Elitzur et L. Vaidman utilisent un interféromètre, c'est-à-dire un appareil composé de deux miroirs et de deux lames séparatrices. La lumière pénétrant dans l'interféromètre arrive sur une des deux lames et se répartit entre deux trajets optiques : un trajet «haut», et un trajet «bas». Les faisceaux se rejoignent sur la seconde lame, qui envoie la lumière sur deux détecteurs de photons (voir la figure 4). Ainsi l'interféromètre offre à chaque photon deux chemins possibles entre la source lumineuse et le détecteur.

Quand on ajuste les longueurs des trajets optiques de sorte qu'elles soient égales, le dispositif est comme un interféromètre de Young. Les détecteurs remplacent l'écran où apparaissent les franges claires et sombres. L'un des détecteurs ne détecte que l'équivalent des franges claires d'une figure d'interférences (nous le nommerons détecteur D-clair) ; l'autre enregistre les franges sombres (nous le nommerons détecteur D-sombre).

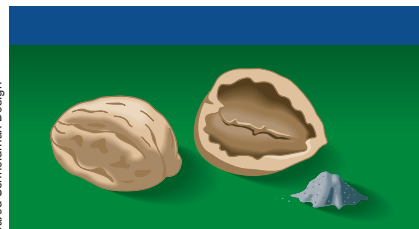
Un caillou dans le passage

Que se passe-t-il quand un caillou bloque l'un des trajets optiques, par exemple le trajet supérieur ? Si l'on considère que la première lame séparatrice répartit les photons au hasard, alors la probabilité qu'un photon suive la trajectoire supérieure est égale à 50 pour cent ; cette probabilité est donc celle que le photon heurte le caillou et ne parvienne jamais à la seconde lame.

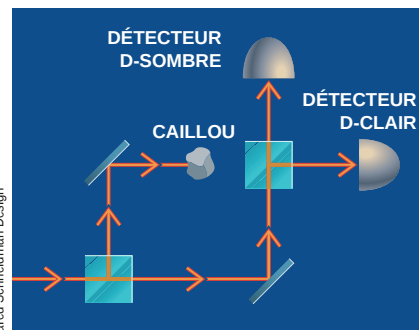
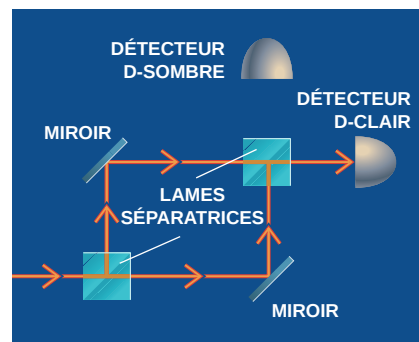
Si le photon suit le trajet inférieur, il ne rencontre pas le caillou. En outre, il n'y a plus d'interférences, car le photon ne parvient à la seconde lame que suivant un seul trajet. Aussi le photon fait un autre choix aléatoire, à la seconde lame : il peut être réfléchi, et frapper le détecteur D-clair, ce qui ne fournit pas d'information, car l'événement aurait pu se produire même si le caillou n'avait pas été là. Cependant le photon peut aussi frapper le détecteur D-sombre : nous saurons alors avec certitude que le caillou se

trouvait sur l'un des chemins de l'interféromètre, car si tel n'était pas le cas, le détecteur D-sombre n'aurait rien capté ; et, dans la mesure où un seul photon a été envoyé et qu'il a atteint le détecteur, il n'a pas pu heurter le caillou. Ainsi nous avons réalisé une mesure sans interaction : nous avons déterminé la présence du caillou sans interagir avec lui.

Bien que cette procédure ne soit efficace que dans certains cas, l'efficacité est absolue dans les cas favorables. La base de cette magie quantique est



3. LE JEU DE BONNETEAU a été réexploré par les physiciens qui ont voulu démontrer la faisabilité de la mesure sans interaction. Imaginons qu'un caillou sensible à la lumière soit caché sous des coquilles de noix. Comment déterminer sa position sans retourner les coquilles, ce qui risquerait de le transformer en poussière ?



4. DANS L'EXPÉRIENCE de C. Elitzur et L. Vaidman, un photon a le choix entre deux chemins optiques. Les éléments optiques sont disposés de sorte que les photons aillent toujours au détecteur D-clair, et jamais au D-sombre (en haut). Toutefois, la présence d'un caillou sur l'un des trajets envoie parfois un photon sur le détecteur D-sombre (en bas) : une mesure sans interaction a alors eu lieu.

la dualité ondulatoire et corpusculaire des objets microscopiques. Lorsque l'interféromètre est vide, la lumière se comporte comme une onde. Elle peut atteindre les détecteurs en empruntant les deux chemins simultanément, ce qui produit des interférences. Quand un caillou s'interpose, la lumière se comporte comme une particule indivisible, qui ne suit qu'un seul des trajets. La seule présence du caillou élimine la possibilité d'obtenir des interférences, même si le photon n'a pas interagi avec lui.

Pour explorer l'idée de C. Elitzur et L. Vaidman, nous avons réalisé une expérience qui en reprend les principes, démontrant du même coup la faisabilité d'appareils de mesure sans interaction. La source de photons que nous avons utilisée, avec notre collègue Thomas Herzog, de l'Université de Genève, était un cristal non linéaire : lorsque des photons ultraviolets émis par un laser le traversent, ils sont parfois transformés en deux photons d'énergie inférieure, dont les trajectoires s'écartent d'environ 30 degrés. Quand on détecte un de ces photons, on est certain de l'existence de l'autre photon, qui est émis dans le système expérimental où nous effectuons la mesure sans interaction.

Ce dernier est un interféromètre un peu différent de celui qui avait été initialement proposé : les miroirs et les lames séparatrices sont disposés (voir la figure 5), de sorte que la plupart des photons sortent du montage à l'endroit où ils sont entrés (ce qui revient à aller au détecteur D-clair dans l'expérience de pensée, ou à aller sur une frange claire dans l'expérience des fentes d'Young) ; en l'absence du caillou, la probabilité qu'un photon parvienne au détecteur D-sombre est très faible en raison d'interférences destructives (l'équivalent des franges sombres de l'expérience des fentes d'Young).

L'introduction d'un caillou sur le trajet change les probabilités. Dans notre expérience, le caillou est un petit miroir qui dirige la lumière vers un autre détecteur (le détecteur D-caillou). Quand nous avons fait l'expérience, nous avons trouvé que le détecteur D-caillou enregistrait le photon dans la moitié des cas, et le détecteur D-sombre dans un quart des cas ; le reste du temps, le photon quittait l'interféromètre comme il y était entré, sans fournir d'information. L'excitation du