

DM n°3 : Petit voyage dans le monde des quanta

Travail à rendre pour le jeudi 5 mars 2015.

Lire le texte ci-dessous, constitué d'un extrait du livre *Petit voyage dans le monde des quanta* d'Etienne Klein (éditions Champs Flammarion), puis répondre, en s'appuyant sur des sources documentaires (encyclopédies, Internet), aux questions suivantes.

1. Pourquoi une remise en question de la physique classique à l'échelle microscopique était-elle nécessaire ? Citer deux exemples de phénomènes auxquels les physiciens du début du XX^{ème} siècle trouvaient pas d'explication classique.

2. Donner au moins 5 exemples d'applications de la physique quantique à des objets de la vie de tous les jours. En d'autres termes, des exemples d'objets qui n'auraient pas pu être construits sans la théorie quantique (en expliquant si possible pour quel phénomène, intervenant dans le fonctionnement de ces objets, la connaissance de cette théorie est nécessaire).

3. Etienne Klein considère que la fondation de la physique quantique peut être qualifiée de révolution dans le domaine des idées. Citer au moins 2 autres exemples historiques de révolutions des conceptions scientifiques (dont une au moins dans le domaine des sciences de la vie, pas de patriotisme physicien), en expliquant à chaque fois brièvement en quoi consistait le bouleversement conceptuel.

4. S'appuyer sur l'expérience des 2 fentes pour expliquer – en développant autant que nécessaire – ce en quoi consiste la dualité onde-corpuscule.

5. Historiquement, pour quel objet l'hypothèse de cette dualité fut-elle proposée pour la première fois par Planck, puis par Einstein ? S'agit-il d'un objet de nature matérielle ?

6. En quoi son extension à des objets de nature matérielle (tels que les électrons de l'expérience du texte) constitue-t-elle, sur le plan du comportement physique, une unification de deux réalités jusque-là considérées comme fondamentalement dissemblables ?

7. Expliquer la phrase : « Il nous faut par ailleurs admettre que les propriétés que nous attribuons à une particule dépendent des caractéristiques du dispositif dans lequel elle évolue. » (dans la première leçon de l'expérience)

8. Que pensez-vous de la phrase « Dès lors, quel sens cela a-t-il de parler des propriétés d'un objet microscopique tant qu'aucune mesure n'a été effectuée sur lui ? » (dans la deuxième leçon de l'expérience)

9. En quoi la quatrième leçon, sur la remise en question de la trajectoire, permet-elle de jeter une lumière sur le fait que les atomes ne s'effondrent pas sur eux-mêmes

par rayonnement, comme l'auteur l'explique en introduction ?

Introduction

Voici un atome, un atome d'hydrogène, le plus simple de tous. Le plus petit aussi, ne serait-ce que du point de vue du nombre de ses constituants. Son noyau se résume à un simple proton, autour duquel un unique électron, minuscule, tourbillonne sous l'effet de la force électrique attractive qui le lie au proton, de charge électrique opposée à la sienne. Ce petit système nous rappelle un duo que nous connaissons bien, celui formé par le Soleil et la Terre.

Imaginons que cette analogie soit exacte, que l'atome d'hydrogène soit effectivement un système planétaire miniature, microscopique même, dans lequel le proton jouerait le rôle du Soleil et l'électron celui d'une planète. En supposant ainsi qu'il n'y a entre ces deux systèmes qu'une différence de taille (le premier étant la réduction à l'identique, jusqu'à des dimensions infimes, du second), nous faisons de l'atome un objet presque familier. Mais pareille métaphore est-elle pertinente ?

Si notre modèle est juste, l'électron doit avoir une trajectoire bien définie, aussi précisément déterminée que celle d'une planète qui gravite autour du Soleil : il est condamné à tourner sans lassitude autour du proton selon une certaine orbite. C'est du moins ce que conçoit la mécanique classique, qui n'envisage que des objets matériels précisément localisés dans l'espace, ayant des trajectoires bien définies, entièrement déterminées par les forces auxquelles ils sont soumis.

En réalité, les choses ne sont pas si simples pour notre électron. Du fait qu'il tourne autour du proton, il subit une accélération radiale (centripète), tout comme une voiture dans un virage. Dans ces conditions, les équations de l'électromagnétisme nous disent que l'électron, parce qu'il porte une charge électrique, perd de son énergie en émettant de la lumière (c'est sa façon à lui de faire crisser ses pneus).

Jusque-là, rien de grave. Au contraire, même : les atomes ne sont-ils pas justement capables d'émettre de la lumière ? Notre modèle pourrait donner à ce phénomène un début d'explication. Mais à bien y regarder il y a là un hic gravissime : puisqu'il perd de l'énergie, l'électron se rapproche inexorablement du proton en suivant une spirale, jusqu'à finalement s'écraser sur lui ! C'est la catastrophe ! Notre modèle, pourtant si adapté au Soleil et aux planètes (celles-ci ne tombent apparemment pas sur le Soleil), fait de l'atome d'hydrogène une entité inapte à la durée, incapable, de surcroît, d'émettre la moindre lumière : l'électron ne mettrait en effet qu'une fraction de seconde

à tomber sur le proton. Mais cet ultimatum lancé à l'atome ultime n'est jamais respecté : les atomes sont des édifices stables, contrairement à ce qui se produirait s'ils étaient réellement semblables à des systèmes planétaires miniatures.

Quelle leçon tirer de cette petite histoire ? Elle consiste essentiellement à reconnaître que les principes de la physique classique, et plus généralement les concepts familiers, ceux auxquels la vie quotidienne nous confronte, ne sont pertinents que dans un domaine limité. Aux portes de l'infiniment petit ils semblent brutalement faire faillite.

Les physiciens de la première moitié du XX^{ème} siècle ne tardèrent pas à comprendre que, pour décrire les atomes puis les particules, il leur faudrait abandonner quelques-uns des principes les mieux ancrés de la physique classique et mettre entre parenthèses d'illustres *credo*. Quelques décennies d'effervescence créatrice, d'audace conceptuelle, de tourments et surtout d'intense labeur suffirent à un petit nombre d'entre eux pour fonder l'une des plus belles constructions intellectuelles de tous les temps. *Au terme de ce qui fut rien de moins qu'une révolution*, ils mirent sur pied un nouveau formalisme très efficace pour cerner le monde des particules, des noyaux, des atomes, des molécules : le formalisme de la physique quantique.

L'appellation « physique quantique » mérite au passage une double explication. L'adjectif « quantique », d'abord, vient du mot latin *quantum*, qui signifie « combien » et que l'on retrouve dans *quantité*. Nous verrons que la physique quantique fait intervenir des quantités élémentaires (ou « discrètes », selon le vocabulaire du physicien) pour décrire les interactions entre la lumière et la matière, par exemple. Mais l'accent souvent mis sur les aspects discrets de la théorie est sans doute trop marqué, car la théorie quantique n'est ni plus discrète ni plus continue que la théorie classique. Elle a ceci de révolutionnaire qu'elle applique ces notions de discret et de continu aux mêmes entités, alors que la physique classique les réservait à des entités différentes : corpuscules pour l'aspect discret, ondes pour l'aspect continu.

Son formalisme rend parfaitement compte, entre autres choses, de la stabilité des atomes et de la façon dont ces atomes se manifestent à nous, en précisant notamment les caractéristiques de la lumière qu'ils absorbent ou émettent : lorsqu'un de leurs électrons passe d'un état quantique à un autre, les atomes émettent ou absorbent un photon dont l'énergie est exactement égale à la différence d'énergie entre l'état de départ de l'électron et son état d'arrivée. La physique quantique permet également de décrire le comportement des particules élémentaires, qu'on aurait tort d'assimiler – conformément à une représentation trop courante – à de microscopiques petites billes, et explique comment les particules interagissent.

Mais, contrairement à ce que l'on a souvent tendance à croire, la physique

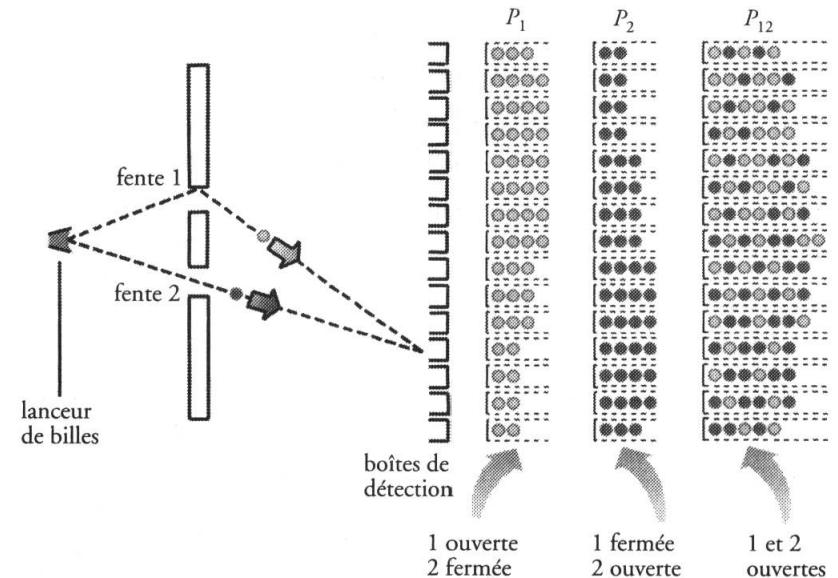


FIGURE 1 – L'expérience des deux fentes avec des billes.

quantique ne concerne pas que l'échelle microscopique : il faut également y avoir recours pour expliquer nombre de phénomènes macroscopiques. Cela vient de ce que les lois quantiques gouvernent de façon sous-jacente la plupart des propriétés et des caractéristiques des processus ou des corps qui nous environnent (processus chimiques, gaz et liquides, solides, métaux et isolants, etc.). Même la vie, dans la mesure où elle dépend de processus physico-chimiques au niveau de la molécule d'ADN, ne pourrait être décrite en dehors des lois quantiques.

La portée de la physique quantique va également bien au-delà du seul domaine cognitif ou explicatif. Depuis une cinquantaine d'années, ses applications pratiques ont été innombrables, qui vont du laser à la cryptographie en passant par la communication, les sciences des matériaux, l'électronique et, demain, les nanotechnologies. Loin d'être une discipline marginale, elle jouit désormais d'une efficacité opératoire impressionnante. Si certaines de ses prédictions semblent ahurissantes, aucune à ce jour n'a été démentie par l'expérience.

La physique quantique a en outre ceci d'original qu'elle ne se fonde pas seulement sur un formalisme, c'est-à-dire sur un ensemble de concepts ma-

thématiques et d'équations. Elle requiert également ce que l'on appelle une interprétation physique. Des 1927, alors que la physique quantique formelle vient tout juste d'apparaître, les physiciens commencent déjà à se soucier de son interprétation : ils essaient de comprendre en quoi elle consiste, ils discutent les règles selon lesquelles il convient de l'utiliser, et certains d'entre eux s'interrogent sur le type de discours qu'elle autorise ou interdit sur la réalité physique. Ce point-là est tout à fait singulier : jamais une autre discipline scientifique n'avait à ce point exigé que soit également mis en oeuvre un travail d'interprétation pour pouvoir être comprise et appliquée.

La faillite des concepts familiers

La physique quantique repose sur un formalisme mathématique extrêmement puissant, mais qu'on ne peut transposer en des phrases appartenant à la langue commune. Il est donc déraisonnable, voire illicite, de vouloir la présenter sans équations. Délaissant – bannissant même – le visuel et le sensible au profit du seul formel, elle se retrouve presque sans connexion avec notre façon habituelle de dire le monde qui nous entoure. Des lors, comment l'exposer, sans la trahir, avec de simples mots ? Angoisse de l'auteur... La clé consistera sans doute à faire sentir au lecteur comment cette physique iconoclaste est née d'une crise de la représentation. A la question : « Quel genre d'objet sont les particules ? », la physique quantique a fourni une réponse étonnante... qui semble accorder davantage de réalité à ce qui se cache qu'à ce qui se montre.

Rappelons que la physique classique distingue essentiellement deux sortes d'objets, en un sens opposés : les corpuscules, d'une part, les ondes, d'autre part. Cette dichotomie s'appuie sur des considérations simples : les corpuscules sont des entités punctiformes, c'est-à-dire localisées dans une région très restreinte de l'espace, tels des grains de sable dont on tenterait de réduire la taille à zéro ; ils décrivent des trajectoires nettes le long desquelles, à tout instant, leur position et leur vitesse sont bien déterminées. Les ondes, au contraire, ne sont pas précisément localisées ; elles occupent, sinon tout l'espace, du moins une certaine étendue spatiale et n'ont pas plus de trajectoire que la houle de l'Atlantique venant frapper les côtes bretonnes.

D'autres aspects distinguent les ondes des corpuscules. Une différence en particulier se révélera capitale pour la suite : les ondes sont capables de se « superposer », du moins si elles sont de même nature physique (électromagnétique, acoustique...). Cela signifie que la somme de deux ondes de même type a un sens physique parfaitement défini. Songeons aux ondes que nous pouvons créer sur un étang. Si nous agissons un bâton dans l'eau à un cer-

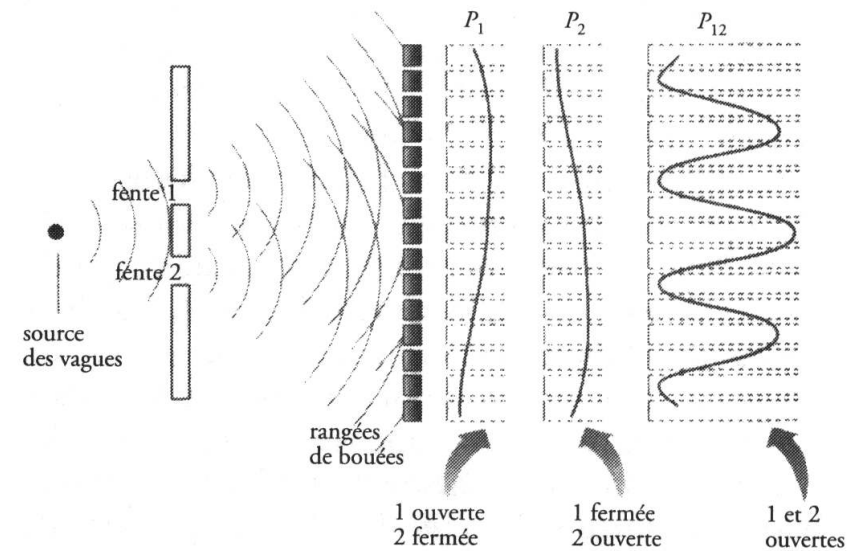


FIGURE 2 – L'expérience des deux fentes avec des vagues.

tain endroit, celui-ci devient le centre d'un système d'ondes concentriques. Si nous agissons le bâton à un autre endroit, nous créons un autre système d'ondes, dont le centre est ailleurs. Si ensuite nous agissons simultanément un bâton en chacun de ces deux endroits, nous provoquons un système d'ondes plus compliqué formé par la combinaison des deux premiers : *cette onde résultante, qui est elle aussi un mode d'oscillation de la surface de l'étang, n'est autre que la superposition des deux premières*. Elle s'obtient en faisant l'addition, en chaque point de l'étang, des amplitudes des ondes composantes. Cette propriété de pouvoir s'additionner, le cartel des ondes la détient en exclusivité : deux corpuscules (ou deux petites boules) seraient tout à fait incapables de se superposer.

Il ne semble donc guère y avoir de parenté entre l'onde et le corpuscule. Pour chaque phénomène physique, la question se pose : appartient-il au camp des ondes ou à celui des corpuscules ? C'est à propos de la lumière que cette interrogation a atteint la plus dramatique intensité, notamment au XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème} : la lumière est-elle un corps spécifique ou est-elle le mouvement spécifique d'un corps ?

De curieuses interférences

Une expérience aussi simple que célèbre, dite « des deux fentes », dont Richard Feynman disait à juste titre qu'elle résumait à elle seule la quintessence de l'étrangeté quantique, montre en définitive que, *pour la lumière aussi bien que pour tout autre objet microscopique*, ces deux approches sont simplistes et insuffisantes. Il faut impérativement les dépasser.

Pour nous en convaincre, imaginons une machine lançant des billes vers un mur percé de deux fentes parallèles et proches l'une de l'autre, comme indiqué sur la figure 1. Supposons qu'elle propulse toutes les billes à la même vitesse mais dans des directions quelconques. Un peu plus loin, disposons des boîtes qui réceptionnent les billes ayant franchi le mur. La plupart des billes sont arrêtées par le mur. D'autres passent par la première ouverture ou par la seconde, soit directement, soit en ricochant sur l'un des bords. Si, après avoir lancé un grand nombre de billes, on compte celles récupérées dans chacune des boîtes, on obtient un échantillonnage qui indique la variation de la probabilité d'arrivée des billes avec la position du point d'impact. Le nombre total de billes dans une boîte particulière est la somme de celles entrées par la fente 1 et de celles passées par la fente 2. Autrement dit, la probabilité P_{12} qu'une bille arrive dans une certaine boîte lorsque les deux fentes sont ouvertes est la somme de la probabilité P_1 qu'elle y arrive lorsque seule la fente 1 est ouverte (billes blanches sur la figure) et de la probabilité P_2 qu'elle y arrive lorsque seule la fente 2 est ouverte (billes noires) :

$$P_{12} = P_1 + P_2.$$

Cette addition traduit un fait simple. Pour arriver dans une boîte donnée, une bille se voit offrir deux possibilités, et deux seulement : elle passe soit par la fente de droite, soit par la fente de gauche.

Retenons la même expérience avec des ondes, cette fois, par exemple des vagues à la surface de l'eau. Le mur percé des deux fentes devient une digue ouverte en deux endroits, et les boîtes sont remplacées par des bouées qui s'élèvent et s'abaissent au rythme des vagues. Laissons la fente 1 ouverte et maintenons la fente 2 fermée. Les amplitudes d'oscillation des différentes bouées sont indiquées sur la figure 2. En revanche, si la fente 1 est fermée, nous obtenons un autre profil, lui aussi indiqué sur la figure. Enfin, si les deux fentes sont laissées ouvertes, nous découvrons un profil très différent de celui obtenu avec les billes. Apparaissent ce que l'on appelle des interférences.

Certaines bouées demeurent pratiquement immobiles. Car, lorsque le train d'ondes qui provient de la fente 1 rencontre celui qui provient de la fente 2, apparaissent certains points où les ondes sont toujours en « opposition de phase » : l'une est à sa crête au moment où l'autre est à son creux, et vice

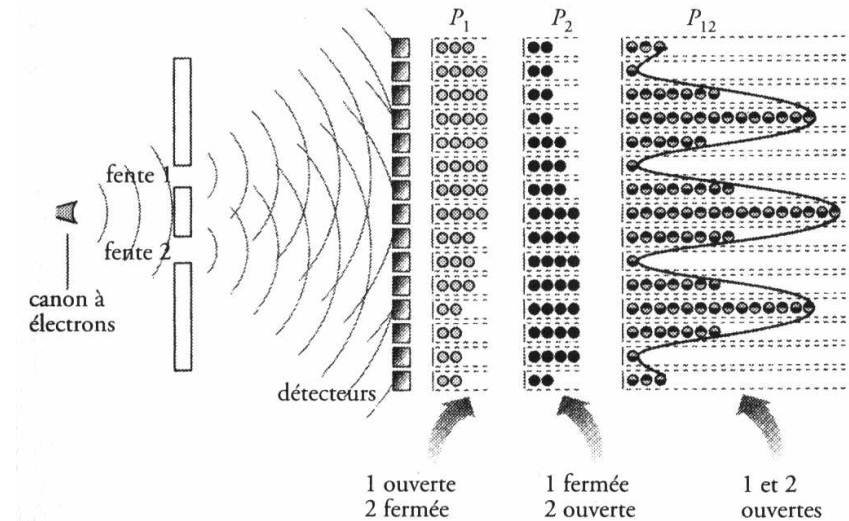


FIGURE 3 – L'expérience des deux fentes avec des électrons.

versa, de sorte que leur somme s'annule toujours en ces points, par destruction mutuelle des amplitudes. En d'autres points, au contraire, les deux ondes s'ajoutent de façon constructive, et dans ce cas l'amplitude de l'onde résultante est le double de celle de chacune d'elles. Ce phénomène d'interférence est la signature d'un comportement ondulatoire (les billes de l'expérience précédente n'interféraient pas). L'expérience des deux fentes apparaît ainsi comme le juge de paix capable de dire à quel genre d'objet nous avons affaire. Si elle donne lieu à des interférences, c'est que l'on est en présence d'ondes. Sinon, ce sont des corpuscules.

Mais qu'en est-il des particules quantiques ? Réitérons l'expérience des deux fentes avec des électrons (voir figures 3 et 4). Un canon à électrons envoie sur une plaque percée de deux fentes des électrons dotés de la même énergie. Le détecteur situé derrière cette plaque est recouvert d'un produit chimique qui blanchit au contact d'un électron. Dans ce type d'expérience, on ne sait pas par quelle fente les électrons passent. Nous conviendrons donc de les représenter moitié blancs, moitié noirs.

Si l'on s'imagine que les particules sont des corpuscules, l'on s'attend à retrouver le même résultat qu'avec les billes. Mais, surprise, on observe sur l'écran des interférences, signature d'un comportement ondulatoire ! Diminuons l'intensité du canon de telle façon que les électrons n'en sortent qu'un

à un, l'émission et l'impact de chacun étant séparés (dans le temps) de ceux du précédent et du suivant. On constate alors que chaque électron est capté en un point bien précis du détecteur. Il ne s'est pas « étalé ». Le phénomène n'est donc pas purement ondulatoire. Chaque nouvel impact qui se produit sur l'écran accrédite l'idée que les électrons sont corpusculaires. Mais prudence ! gardons-nous de conclure trop vite, car petit à petit, à mesure que s'accumulent les impacts d'électrons, se reconstruit sur l'écran le système de franges d'interférences que nous avons obtenu lorsque les électrons avaient été envoyés en grand nombre. Ils ne sont donc pas de simples corpuscules, puisqu'ils forment des interférences lorsqu'ils arrivent en grand nombre. Ils ne sont pas non plus des ondes pures, puisqu'ils sont individuellement détectés comme de petites taches (qui finissent par tracer, en s'accumulant, une figure d'interférence). Un objet peut-il n'être ni une onde ni un corpuscule ?

Rassemblons nos idées. Puisque l'on envoie les électrons un à un, il s'agit de phénomènes indépendants les uns des autres. Chaque électron, s'il était un corpuscule, devrait forcément passer par l'une des fentes, et le fait que l'autre fente soit fermée ou ouverte ne devrait pas avoir d'incidence sur son comportement. Si cette hypothèse était exacte, nous pourrions alors, par la pensée, séparer les électrons en deux lots bien distincts : d'un côté, ceux passés par la fente 1, de l'autre, ceux passés par la fente 2. Pour les premiers, tout devrait se dérouler comme si la fente 2 était fermée, et réciproquement. Il devrait donc y avoir en tout point un nombre d'électrons égal à la somme du nombre de ceux passés par la fente 1 et du nombre de ceux passés par la fente 2, c'est-à-dire une comptabilité identique à celle que nous avons obtenue avec les billes.

L'expérience montre qu'il n'en est rien : les états (ouvert ou fermé) des deux fentes conditionnent la distribution spatiale des électrons sur l'écran ; curieusement, ouvrir une seconde fente, c'est-à-dire offrir une possibilité de passage supplémentaire à l'électron, c'est l'empêcher d'arriver à certains endroits puisque apparaissent alors des franges sombres qui sont autant de zones interdites !

Un point de notre raisonnement était donc erroné. Lequel ? Dans l'expérience précédente, nous ne pouvions pas dire par quelle fente chaque électron était passé. Reprenons-la, mais en nous attachant à déterminer par quelle fente chaque électron passe. Plaçons donc une source de lumière derrière la plaque et arrangeons-nous pour que, lorsque l'électron passe par une fente, de la lumière soit détectée en provenance de la fente en question (voir figure 5). Grâce à ce dispositif, on peut marquer les électrons : en blanc ceux passés par la première fente, en noir ceux passés par la seconde. Fermons d'abord la fente 2. Les électrons (blancs) se répartissent alors comme l'auraient fait des billes. Fermons ensuite la fente 1 et rouvrons la 2. Les électrons (noirs)

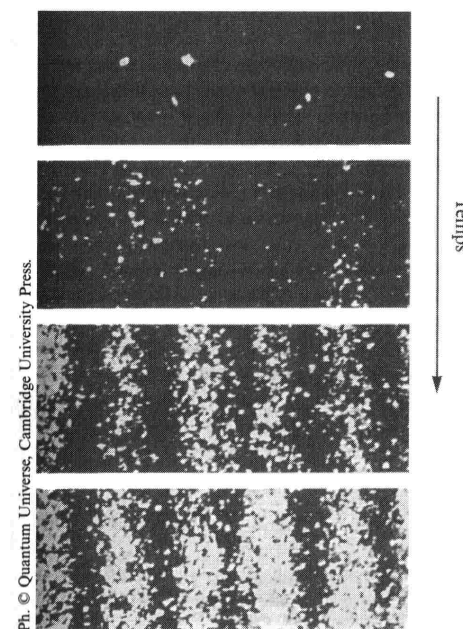


FIGURE 4 – Photo du résultat expérimental à différents temps. Au début, le fait que chaque électron soit capté en un point précis va dans le sens d'une nature corpusculaire (plutôt qu'ondulatoire) des électrons. Mais au fur et à mesure que s'accumulent les impacts se construisent des franges d'interférences caractéristiques des ondes...

se répartissent symétriquement par rapport aux électrons blancs. Ouvrons maintenant les deux fentes. Nous n'observons plus d'interférences !

Qu'est-ce à dire ? Si nous cherchons à savoir par quelle fente chaque électron est passé, nous retrouvons un comportement identique à celui des billes. Alors, qu'est donc un électron ?

Résumons-nous calmement. Si l'on fait en sorte de déterminer par quelle fente les électrons passent, on n'observe plus d'interférences. Tout se produit comme s'il s'agissait d'une *autre* expérience que celle réalisée précédemment (sans éclairage des fentes). Réciproquement, si l'on observe les interférences, il devient impossible de répondre à la question : « Par quel trou est passé l'électron ? » Notre erreur se nichait donc là : contrairement à ce que nous avons envisagé, il n'est pas permis de supposer qu'on peut simultanément

observer les interférences et identifier la fente empruntée par chaque électron.

Les leçons de l'expérience

Les résultats de cette expérience des deux fentes sont universels. Ils valent pour toutes les entités conventionnellement appelées « particules », qu'il s'agisse de lumière (les photons) ou de matière (les électrons, protons, neutrons, atomes...). Il est donc important d'en synthétiser les leçons principales.

Première leçon : nous ne pouvons plus imaginer que la particule de l'expérience est un corpuscule puisque cette représentation mène à une contradiction irréductible. Un corpuscule devrait passer par l'une des deux fentes du dispositif, et l'état – ouvert ou fermé – de l'autre devrait lui être indifférent. Ce n'est pas ce que nous observons. Il nous faut par ailleurs admettre que les propriétés que nous attribuons à une particule dépendent des caractéristiques du dispositif dans lequel elle évolue. Si nous utilisons un appareillage rendant les chemins indiscernables, c'est l'aspect ondulatoire de la particule qui se manifeste. Mais si nous utilisons un appareillage permettant de distinguer les chemins, c'est son aspect corpusculaire qui apparaît.

Deuxième leçon : nous avons vu que les particules interféraient lorsque nous ne cherchons pas à savoir par quelle fente elles sont passées. Dans le cas contraire, la figure d'interférence est brouillée. Puisqu'il n'est pas possible, dans un premier temps, de traduire cela autrement qu'avec des mots approximatifs, disons que les particules ont été comme « dérangées », ou « perturbées », par la mesure. Plus précisément, la mesure semble avoir « défini » leur trajectoire au sens où elle a imposé leur passage par une seule fente. Toute mesure apparaît ainsi comme une interaction entre l'objet microscopique sur lequel on effectue cette mesure et l'appareil de mesure proprement dit (qui est, lui, macroscopique). Cette interaction empêche de faire la part entre ce qui revient en propre à l'objet mesuré et ce qui revient en propre à l'appareil de mesure, comme si les propriétés des particules ne pouvaient plus être détachées des conditions de leur manifestation.

De telles conceptions de l'opération de mesure étaient absentes de la physique traditionnelle. Les physiciens s'étaient en effet habitués à l'idée qu'il est toujours possible de concevoir des appareils de mesure dont l'influence sur le système est aussi faible qu'on le veut : lorsqu'on introduit un thermomètre froid dans un liquide chaud, celui-ci se refroidit légèrement (sa température est plus basse après la mesure qu'avant). Mais, puisqu'on peut, en principe, calculer cette variation, on peut aussi l'éliminer par simple soustraction. D'où l'idée qu'idéalement une mesure, quelle qu'elle soit, enregistre objectivement quelque chose qui est « déjà là », sans modifier ses propriétés : elle n'aurait donc qu'un rapport passif avec le réel, se contentant d'opérer sur

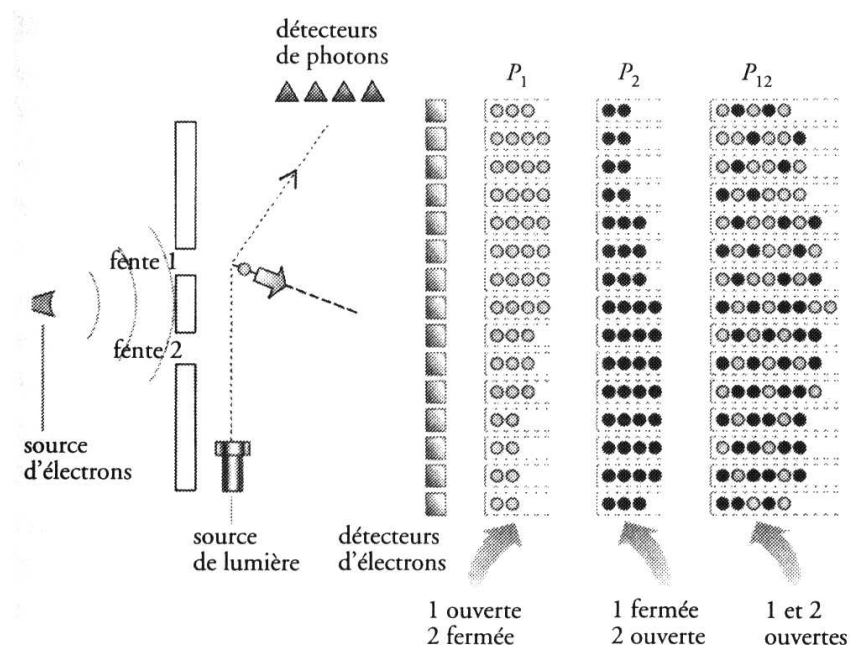


FIGURE 5 – L'expérience des deux fentes avec détermination de la fente par laquelle chaque électron est passé.

lui un simple décalque. La physique quantique a obligé à reconsidérer cette prétendue neutralité de l'opération de mesure, car pour elle le type de calcul que nous évoquions à propos du thermomètre est impossible. Dès lors, quel sens cela a-t-il de parler des propriétés d'un objet microscopique tant qu'aucune mesure n'a été effectuée sur lui ? Cette interrogation sur la réalité des choses en dehors de la mesure ou de l'observation, le lecteur l'a sans doute appréhendée d'une autre façon le jour où il s'est demandé si l'ampoule de son réfrigérateur était bien éteinte lorsque la porte de ce dernier était fermée. Mais elle prend ici une portée nouvelle.

Troisième leçon : une expérience apparaît nécessairement partielle et finalisée. Ses modalités pratiques mettent en place les conditions qui définissent une gamme de phénomènes possibles. Un appareil de mesure peut rendre manifeste telle grandeur particulière, mais non telle autre. Si on pose une question de nature ondulatoire à une particule, par exemple en la faisant diffracter à travers des fentes, sa réponse sera de nature ondulatoire : on obtien-

dra des interférences (même si les points d'impact qui construisent progressivement ces interférences empêchent qu'on oublie tout à fait l'aspect corpusculaire). Si on lui pose une question de nature corpusculaire en cherchant à la détecter avec un écran fluorescent, par exemple, sa réponse sera de nature corpusculaire (son impact sur l'écran sera bien localisé).

La nature des appareillages utilisés détermine donc le type des phénomènes observés. Aucune expérience ne montre une particule se comportant simultanément comme une onde et comme un corpuscule, mais il semble nécessaire d'invoquer ces deux images, quitte à les combiner, pour traduire l'ensemble des résultats des expériences possibles.

Quatrième leçon : la notion de trajectoire, si fondamentale en physique classique, s'effondre littéralement. En effet, observant les interférences, nous ne pouvons pas préciser quel fut le parcours des particules entre la source et l'écran. Nous ne pouvons pas davantage dire au travers de quelle fente les particules sont passées. Il nous est donc impossible de prétendre suivre les particules individuellement et constamment dans l'espace. Elles n'apparaissent qu'ici ou là lors d'une mesure, c'est-à-dire lorsqu'elles sont détectées par un appareil conçu pour effectuer cette détection. Il n'est même pas possible de leur attribuer en pensée, dans l'intervalle séparant deux mesures, une trajectoire bien définie, c'est-à-dire de les imaginer occupant à chaque instant un lieu précis.

Cinquième leçon : les particules de l'expérience ont beau avoir toutes été émises dans des conditions identiques, nous ne savons pas à l'avance de façon certaine à quel endroit chacune d'elles va frapper l'écran. Voilà donc réduite à néant l'idée classique selon laquelle les conditions initiales et les forces mises en jeu suffisent à déterminer le mouvement ultérieur d'une particule. Dès lors, rien ne garantit que nous pourrions calculer autre chose que la probabilité, pour la particule, de se manifester en tel ou tel endroit de l'écran. Le déterminisme classique devra-t-il être abandonné au niveau microscopique ?