

La dualité onde corpuscule.

Une idée rétrospective

Françoise Balibar

*Conférence prononcée le 2 avril 1979 dans
le cadre du Séminaire de Philosophie et
Mathématiques de l'École Normale Supérieure.
Texte revu par l'Auteur le 25 juillet 1995.*

Pourquoi parler de "dualité-onde-corpuscule" alors que la controverse soulevée par cette question semble aujourd'hui éteinte ?

C'est que beaucoup d'indices laissent à penser qu'il n'en est rien et que le conflit subsiste, refoulé. A preuve, la nature contradictoire des discours auxquels donne lieu la question de la dualité "onde-corpuscule". Le discours "vulgaire" (au sens où on parle de vulgarisation) y voit la marque du caractère spécifique de la physique quantique (et, à travers elle, de toute la physique moderne) dont il est couramment admis qu'elle ne peut être que paradoxe, contraire au sens commun; pourtant, pour le commun des mortels, ondes et corpuscules n'ont rien de contradictoire et l'existence d'une dualité onde-corpuscule ne peut être immédiatement ressentie comme paradoxale; de fait, comme nous le verrons dans un instant, elle ne peut l'être que par des spécialistes.

Mais les spécialistes, eux, nient qu'il y ait un problème; à les entendre, la question est depuis longtemps réglée et ne les empêche plus de dormir... ou du moins de faire de la physique. Comme toutes les dénégations, celle-ci doit être suspectée. Cette question ne serait-elle alors qu'un simple vestige d'un état antérieur de la théorie ?

Je voudrais montrer ici qu'il en est de la dualité onde-corpuscule comme de ces vieux meubles dont on a hérité de ses parents et dont on n'ose pas se débarrasser par piété filiale; ils encombrant, à la fois la maison et l'esprit; plus même, ils empêchent de s'assumer en tant qu'adulte, de vivre par soi-même et d'aborder de front les vraies questions. . .

Pour cela, il importe de retracer ne serait-ce que succinctement l'histoire de l'idée de dualité onde-corpuscule.

Naissance d'une idée

Tout commence avec Einstein. Reprenant, en 1905, une idée avancée par Planck, Einstein émet l'hypothèse des quanta; hypothèse selon laquelle la lumière, et plus généralement toute onde électromagnétique, est constituée par un jet de photons, grains d'énergie, porteurs individuels d'un quantum d'énergie dont la valeur E est liée à la fréquence ν de l'onde par la relation :

$$E = h\nu$$

où h désigne la constante dite de Planck.

En quoi cette hypothèse, qui permet (entre autres) d'expliquer l'effet photo-électrique nou-

vement découvert, est-elle révolutionnaire ? C'est que, pour la physique classique (entendons par là, la physique d'avant 1905), tout système physique peut se comprendre et s'analyser par le jeu combiné de deux notions fondamentales et antithétiques, celle d'onde (ou champ) et celle de particule (ou corpuscule).

Pour la physique classique, les particules sont des entités discrètes, individualisées (on peut les compter, les dénombrer) et localisées (leur extension spatiale est nulle, qu'il s'agisse d'ailleurs d'un grain de poussière ou d'une planète en révolution); chaque particule occupe, à chaque instant, une position ponctuelle dans l'espace et, au cours du temps, son mouvement se fait le long d'une trajectoire; c'est un mouvement cursif. Les ondes, elles, sont concues comme possédant des propriétés radicalement opposées aux précédentes; un champ est une entité continue, définie en tout point de l'espace, dont l'extension est infinie (même si le champ ne prend de valeurs non nulles que dans une zone de dimension finie); au cours du temps, une onde se propage; son mouvement est de type frontal (on parle de "front d'onde" et de "surface d'onde").

Ondes et particules sont donc conçues comme les deux pôles d'un couple de contraires; cet antagonisme se manifeste de façon particulièrement nette quand on compare le comportement de deux particules qui se rencontrent à celui de deux champs dans la même situation. Alors que les particules qui ne peuvent occuper simultanément un même point de l'espace entrent en collision, ce qui a pour effet de modifier leurs trajectoires, les ondes, au contraire, se superposent pendant un certain temps, puis poursuivent leur progression comme si de rien n'était; ce "principe" de superposition est à l'origine des phénomènes (typiquement ondulatoires) d'interférence observés dans la zone de recouvrement ; c'est également lui qui fonde l'analyse mathématique des phénomènes de type ondulatoire (analyse et synthèse de Fourier).

Que la lumière appartienne à la catégorie "ondes" ne faisait de doute pour personne en 1905, depuis la mise en évidence, près d'un siècle auparavant, par Young et Fresnel, d'interférences lumineuses. La théorie de l'électromagnétisme de Maxwell, en précisant la nature du champ lumineux, était venue couronner l'édifice théorique de l'Optique. On comprend dans ces conditions que l'hypothèse de grains d'énergie lumineuse, de corpuscules de lumière, ait eu un caractère révolutionnaire. Non pas parce qu'elle aurait conduit à remettre en question les hypothèses ondulatoires de Fresnel et la théorie de Maxwell; mais parce qu'elle remettait en cause l'idée qu'un objet physique doit nécessairement appartenir à l'une ou à l'autre catégorie, onde ou corpuscule. Le conflit venait de ce que pour expliquer à la fois les phénomènes d'interférence et l'effet photo-électrique, on était obligé de mélanger deux catégories jusqu'alors pensées comme disjointes; c'est en cela que résidait le paradoxe qui, on le voit, ne pouvait heurter le sens commun que des physiciens. C'est ce que de Broglie, dans un de ses cours rédigés, exprime clairement:

"Pendant toute la fin du siècle dernier, les physiciens ont accumulé un nombre énorme de vérifications extrêmement précises des théories de l'optique ondulatoire. Après cette longue et minutieuse mise à l'épreuve, il paraissait inconcevable qu'on puisse être amené à remettre en question sa validité. C'est cependant l'inconcevable qui s'est réalisé après la découverte de l'effet photo-électrique".

Remarquons ici le terme "inconcevable" employé par de Broglie. C'est bien de cela qu'il s'agit: la lumière se situe "hors des concepts" de la physique classique; nous aurons l'occasion de revenir sur ce point.

Pendant près de vingt ans, de 1905 à 1923, la lumière fut donc pensée, faute de mieux,

comme un objet à part. Idée peu satisfaisante cependant, car l'esprit scientifique répugne à la multiplication des exceptions. C'est cette insatisfaction qui est à l'origine des travaux de de Broglie:

"L'idée qui dans mes travaux de 1923-1924 a servi de point de départ à la Mécanique Ondulatoire a été la suivante: puisque pour la lumière, il existe un aspect corpusculaire et un aspect ondulatoire reliés entre eux par la relation $E = hv$, il est naturel de supposer que pour la matière aussi, il existe un aspect corpusculaire et un aspect ondulatoire, ce dernier jusque là méconnu".

En 1924, de Broglie énonce sa fameuse hypothèse qui est aux particules de matière ce que l'hypothèse d'Einstein est à la lumière: toute particule de masse m animée d'un mouvement de vitesse uniforme v , et donc possédant une quantité de mouvement $p = mv$ manifeste un caractère ondulatoire, caractérisé par la longueur d'onde

$$\lambda = h/p$$

Hypothèse qui devait se trouver immédiatement confirmée par l'expérience de Davisson et Germer. En faisant se réfléchir des électrons sur la surface d'un cristal, Davisson et Germer montrèrent que la réflexion n'avait lieu que pour certaines valeurs de l'angle d'indice dépendant de la vitesse des électrons; ce phénomène est exactement semblable à ce qui se passe quand on fait se réfléchir des rayons X sur la surface d'un cristal; il n'y a pas de faisceau réfléchi, sauf pour certaines valeurs bien précises de l'angle d'incidence, liées à la longueur d'onde des rayons X par la relation dite de Bragg; appliquant la relation de de Broglie aux électrons de l'expérience de Davisson et Germer, on constate que les angles pour lesquels il y a réflexion suivent effectivement la relation de Bragg.

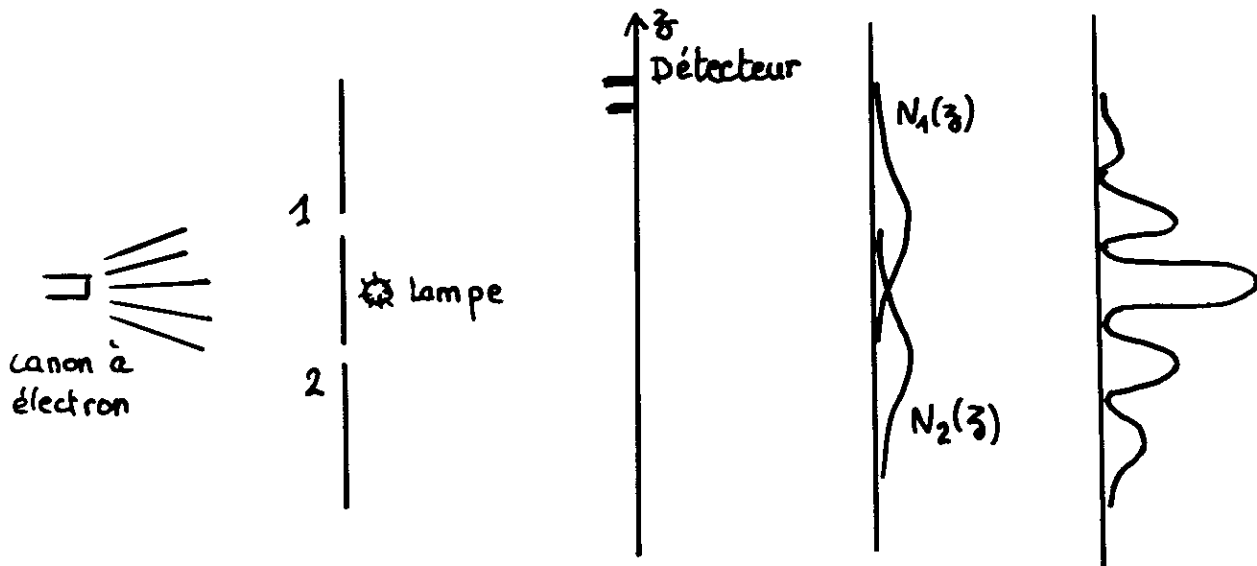
La conception dualiste

En 1924, le sentiment général est donc le suivant: on vient de découvrir (au sens de révéler) un aspect insoupçonné de la Nature, aspect que le manque de finesse de nos observations antérieures nous masquait jusqu'alors. De plus cette découverte ne peut s'expliquer dans le cadre conceptuel existant; elle est à proprement parler "inconcevable". Face à cette situation, deux attitudes, deux conceptions (on dit souvent deux interprétations) vont se développer et s'affronter, l'une de type dualiste et l'autre de type unitaire.

Pour les tenants de l'interprétation dualiste (Bohr et Heisenberg en sont les représentants les plus connus), les effets nouvellement mis en évidence (l'effet photoélectrique et l'expérience de Davisson et Germer ne sont que les premiers éléments d'une suite d'expériences qui remettent en cause la physique classique) nous ont ouvert les yeux sur la véritable nature des choses: la Nature obéit à un principe de dualité et tout objet est à la fois, et de façon "complémentaire" selon Bohr, onde et corpuscule; l'antagonisme sur lequel repose toute la physique classique n'est que l'apparence des choses: ondes et corpuscules ne sont que deux aspects (on dit encore deux images) d'une même réalité duale; ces deux images sont tout aussi vraies l'une que l'autre... et tout aussi fausses. Si on a pu pendant trois cents ans penser ondes et corpuscules comme deux classes disjointes, c'est que la Nature, suivant les conditions expérimentales, nous révèle l'une ou l'autre de ses deux faces, mais jamais les deux à la fois. On le voit, l'interprétation dualiste, dont la logique repose entièrement sur le jeu combiné du "et" (réalité) et du "ou" (apparence) liant le couple onde corpuscule, ne se conçoit pas en fait, sans un principe, dit principe de complémentarité, excluant la possibilité qu'un même objet nous apparaisse, dans une situation

expérimentale donnée, comme à la fois onde et corpuscule. C'est effectivement ce qui se passe: on ne peut faire apparaître le caractère corpusculaire d'un phénomène ondulatoire (et vice-versa) qu'en modifiant les conditions expérimentales; c'est là la manière dont Bohr interprète les relations de Heisenberg.

Ce point vaut d'être précisé sur un exemple. Considérons une expérience où se manifeste le caractère ondulatoire des électrons, par exemple grâce au dispositif bien connu des trous de Young. La courbe $N(z)$ de répartition des électrons sur l'écran présente une alternance de maxima et de minima (ou franges) caractéristiques des phénomènes d'interférence. Essayons maintenant de mettre en évidence le caractère corpusculaire de ces électrons et pour cela cherchons à déterminer par quel trou est passé chaque électron qui vient heurter l'écran en z . A cet effet, plaçons en arrière des deux trous, une petite lampe témoin qui enverra un éclair vers le haut chaque fois qu'un électron passera par le trou du haut et un éclair vers le bas chaque fois qu'un électron passera par le trou du bas. Comme, avant d'arriver sur l'écran, un électron doit nécessairement être passé par l'un ou l'autre trou, on s'attend à ce qu'en ajoutant pour chaque valeur de z , le nombre $N_1(z)$ de flashes vers le haut au nombre $N_2(z)$ des flashes vers le bas, la courbe $N_1(z) + N_2(z)$ des impacts sur l'écran soit identique à la courbe $N(z)$ observée en l'absence de lampe. On constate qu'il n'en est rien; la courbe $N_1(z) + N_2(z)$ est régulière et ne présente pas de franges; elle ressemble tout à fait à la courbe qu'on obtiendrait si au lieu d'électrons on avait utilisé des petits projectiles. Autrement dit; nous avons réussi, grâce à la lampe, à mettre en évidence le caractère corpusculaire des électrons, mais en même temps nous avons fait disparaître les franges, manifestation ondulatoire du phénomène.



Or, il est clair qu'en introduisant la lampe nous avons modifié les conditions expérimentales; l'interaction du rayonnement lumineux avec les électrons (qui provoque les flashes observés) modifie le comportement des électrons; au point que ces électrons qui nous montraient leur aspect ondulatoire dans l'expérience "nue" des trous de Young, nous font maintenant voir leur caractère corpusculaire. On peut alors songer (toujours dans l'intention de mettre en évidence simultanément les deux caractères) à diminuer les modifications apportées par la lampe, en abaissant la fréquence de la radiation émise (on sait que l'énergie lumineuse est proportionnelle à la fréquence). On constate alors que tant que la fréquence reste suffisamment élevée, la courbe des impacts ne présente pas de franges et que celles-ci réapparaissent en dessous d'une certaine fréquence; mais on constate également qu'au moment où les franges réapparaissent, les éclairs émis au passage d'un électron deviennent si peu directifs qu'on ne peut plus dire s'ils sont dirigés vers le haut ou vers le bas, nous ôtant ainsi la possibilité de dire par quel trou l'électron est passé. En effet - et c'est là un phénomène bien connu en Optique - deux points ne sont vus comme distincts que si on les éclaire avec une lumière de longueur d'onde suffisamment petite par rapport à leur séparation, donc avec une lumière de fréquence suffisamment élevée. Une fois de plus, la possibilité de mettre en évidence en même temps l'aspect ondulatoire et corpusculaire des électrons nous échappe.

La conception unitaire

Que l'interprétation dualiste soit fortement teintée d'idéalisme ne fait guère de doute; le vocabulaire employé (dualité, complémentarité), le recours à des "principes" l'indiquent nettement. En ce sens, cette conception manifeste un retour, une régression à un état prégaliléen de la physique; poser que les choses sont comme elles sont en vertu d'un principe, c'est là une démarche aristotélicienne, contraire à l'esprit de la physique classique. Il est d'ailleurs intéressant de constater que les principes de dualité, et surtout de complémentarité, ont donné lieu à une exploitation idéologique tous azimuts. Voir à ce propos les considérations de J-P.Sartre, sur la "complémentarité homme/femme", pensée sur le modèle de la complémentarité onde/corpuscule; la question de savoir qui est onde et qui est corpuscule dans ce couple est laissée en suspens..

Rien d'étonnant dans ces conditions à ce que bon nombre de physiciens n'aient pu se contenter de l'interprétation dualiste et s'y soient violemment opposés. Pour eux une telle conception ne peut avoir que des effets anesthésiants. D'une part, le principe de dualité permet d'éviter de poser la question de la nature des choses (ondes ou corpuscules) et d'autre part, le principe de complémentarité, malgré sa référence aux conditions expérimentales, ne fait que masquer notre ignorance temporaire en l'érigeant en principe.

C'est donc au nom du réalisme que s'effectue la critique du point de vue dualiste. Ce qu'Einstein, adversaire résolu du dualisme, exprimait de façon aussi "réaliste" et matérialiste que possible en disant " *Quand je mange, j'aime bien savoir ce qu'il y a dans mon assiette: des pois ou de la soupe aux pois*".

Pour ces réalistes, le dilemme posé par la double apparence de la lumière et des électrons, tantôt ondes et tantôt corpuscules, ne peut être résolu que dans le cadre d'une théorie unitaire: tous les objets doivent être de même nature. Sont-ils, en dernière analyse, ondes ou corpuscules ? A laquelle il faut ajouter une question subsidiaire: une fois déterminée la véritable nature des objets physiques, expliquer pourquoi ils nous apparaissent parfois sous l'autre aspect.

Posée sous cette forme, la question n'appelle que deux réponses: la Nature est faite d'ondes; la Nature est faite de corpuscules.

A la première conception, on peut rattacher les travaux de de Broglie et de Schrödinger. ce que nous avons l'habitude d'appeler corpuscules est pensé "comme le centre d'un phénomène ondulatoire "tendu auquel il est incorporé" (de Broglie). Plus précisément, une particule est conçue comme un "paquet d'ondes" d'extension limitée et sa trajectoire est celle du centre de ce paquet d'ondes.

C'est pourtant l'interprétation corpusculaire qui devait être reprise par la majorité des manuels, fidèles à l'enseignement de l'Ecole de Copenhague. "Le monde est d'essence corpusculaire et les phénomènes ondulatoires ne sont que l'apparence de particules réelles" (Landé); tout phénomène ondulatoire doit être interprété de façon statistique comme les variations locales et temporelles de la probabilité de présence d'une particule.

Sortir de l'alternative

Comme le fait remarquer Landé, point de vue dualiste et point de vue unitaire sont absolument inconciliables: "Si on prend au sérieux l'interprétation statistique de Born, il n'y a pas de place pour la dualité onde/corpuscule". Le point de vue unitaire (qu'il soit corpusculaire ou ondulatoire) paraît à première vue plus satisfaisant que le point de vue dualiste, dans la mesure où il cherche à expliquer ce qui fait problème et ne se contente pas de régler la question par la grâce d'un principe transcendantal. A y regarder de plus près, cependant, on est bien obligé de constater qu'il s'agit d'un point de vue rétrospectif, entièrement tourné vers le passé; il repose en effet sur l'hypothèse implicite que les vieux concepts d'onde et de particule, développés par trois cents ans de physique classique, peuvent, a priori, suffire à rendre compte des nouveaux phénomènes observés. A cet égard, il est significatif que les tenants de la conception unitaire se soient crus obligés de s'en référer continuellement aux grands ancêtres, et en particulier à Newton, lequel est invoqué à la fois par les tenants d'une interprétation ondulatoire (tel de Broglie qui voit dans les conceptions de Newton sur la lumière un "pressentiment" de la Mécanique Ondulatoire) et par ceux qui défendent (tel Born) une conception corpusculaire.

Ce qui frappe également, c'est à quel point ces réalistes sont en fait idéalistes. Car, après tout, ondes et corpuscules ne sont que des concepts, élaborés à partir d'objets de notre expérience sensible, par un processus d'abstraction et d'élagage. Se poser la question de savoir si tel objet est une onde ou un corpuscule, c'est confondre les choses et leur concept. La véritable question est précisément (et c'est ainsi que Bohr pose le problème) celle de l'adéquation de ces concepts élaborés à l'âge classique, à la description théorique de phénomènes nouveaux. Ne faut-il pas prendre le terme d'"inconcevable" employé par de Broglie au pied de la lettre ? Ne faut-il pas sortir du cadre conceptuel de la physique classique et forger de nouveaux concepts spécifiques du domaine quantique, à partir précisément de l'expérience nouvellement acquise ? Comme le dit le physicien américain L.N.Cooper: "Le domaine quantique nous réserve des surprises qui ne peuvent paraître paradoxales qu'à un esprit classique".

Ce qui est en cause, en fait, c'est l'interprétation des relations

$$E = hv \text{ et } p = h/\lambda$$

Ces relations énoncées de façon relativement empiriques à partir des phénomènes nouveaux, sont d'un point de vue strictement classique, absolument monstrueuses, puisqu'elles relient un concept corpusculaire (E ou p) à un concept ondulatoire (v ou λ), alors qu'ondes et corpuscules

sont censés former deux classes d'objets disjointes. Mais on remarque que le lien ainsi établi, l'est par l'intermédiaires de la constante quantique h . C'est là l'indice que dans le domaine quantique les propriétés corpusculaires et ondulatoires fusionnent pour ne former qu'une seule propriété quantique. De la même façon, il faut penser que, toujours dans le domaine quantique, ondes et corpuscules eux aussi doivent être remplacés par un seul et même concept, ni onde, ni corpuscule, un concept spécifiquement quantique et que pour cette raison nous convenons de baptiser "quanton" (mais le nom importe peu).

Si donc on accepte d'abandonner les parages rassurants de la théorie classique, les paradoxes développés à propos de l'effet photo-électrique ou de l'expérience de Davisson et Germer tombent d'eux-mêmes. Les controverses entre dualistes et unitaires, entre partisans d'un monde corpusculaire et partisans d'une conception ondulatoire, apparaissent alors comme de faux débats. Car, comme le dit Dirac: " *Il ne faut pas s'attendre à ce que les phénomènes du domaine atomique relèvent de telle ou telle conception, du moins au sens où l'on entend généralement ce mot; c'est à dire qu'il n'existe pas de modèle classique de ces phénomènes; si, par contre, étendant le sens du mot "conception", on entend pas là une manière d'envisager les lois fondamentales qui rende leur cohérence manifeste, alors, il est possible de forger une conception des phénomènes atomiques et d'acquérir une certaine familiarité avec la théorie quantique*". De fait, c'est bien de cela qu'il s'agit: faire que la théorie quantique nous devienne familière, arriver à l'envisager sans a priori classique, l'accepter telle qu'elle est, même si elle heurte nos préjugés classiques, acquérir un sens physique quantique. " *Pour la génération actuelle de physiciens, c'est la physique quantique qui représente le sens commun, qui lui est familière. Ce sont sa structure et ses relations spécifiques qui pour ces physiciens ont un sens immédiat et une validité intuitive. C'est dans ce domaine que s'exerce leur sens physique, ce sixième sens qui leur permet de distinguer le vrai du faux*" (L.N.Cooper).

On s'aperçoit alors que la véritable question n'est pas celle du passage de la physique classique à la physique quantique, mais bien celle du passage inverse, de la physique quantique à la physique classique. La physique classique est une approximation de la physique quantique; la première question qui se pose est donc: dans quelles conditions peut-on se contenter de la physique classique et quand ne peut-on éviter d'avoir recours à la physique quantique ? C'est précisément à ce genre d'interrogation que répondent certains des travaux de Feynman: partant de la théorie quantique, Feynman a montré comment la Mécanique classique pouvait être déduite du formalisme de cette théorie comme cas limite, celui à l'action caractéristique devient nettement supérieure au quantum d'action de Planck. La démarche de Feynman est ici inverse de celle qui consiste à obtenir des résultats quantiques comme extrapolation de la théorie classique.

Terminons en énonçant une autre de ces "véritables" questions qui, elle, est encore sans réponse. Comment caractériser les quantons qui à l'approximation classique ont un comportement ondulatoire et ceux qui ont un comportement corpusculaire ? Cette dichotomie recoupe-t-elle la dichotomie bosons/fermions qui repose sur des considérations statistiques ? Ou bien ces deux partitions n'ont-elles rien à voir entre elles ?

Aussi étonnant que cela puisse paraître, on en est encore réduit sur ce point à des spéculations