

Avec des gouttes qui rebondissent sur un liquide mis en vibration, les physiciens ont découvert un système classique dont le comportement reproduit étrangement celui des particules quantiques.

Emmanuel Fort et Yves Couder

La dualité onde-corpuscule À L'ŒIL NU

Vers la fin du XIX^e siècle, les choses paraissaient claires aux physiciens. Ils disposaient, pour décrire la nature, de deux types d'objets bien distincts : les objets massifs (qu'il était souvent possible de réduire à des points matériels) et les ondes. On pouvait avec ces outils conceptuels décrire les mouvements des planètes, les propriétés des gaz, la propagation du son, etc.

La lumière restait néanmoins un sujet de débat en raison de sa propagation dans le vide. Après beaucoup d'hésitations, on s'était convaincu que la lumière était une onde plutôt qu'une entité formée de particules. Cet ordre classique a été bouleversé au début du XX^e siècle, notamment lorsque Einstein avança en 1905 que l'effet photoélectrique (l'expulsion d'un électron hors d'un métal éclairé) ne pouvait s'interpréter que si la lumière était formée de grains d'énergie assimilables à des particules (les photons d'aujourd'hui).

Suivant la même logique suivie en sens inverse, le Français Louis de Broglie proposa en 1923 que les particules massives devaient posséder un aspect ondulatoire. Une expérience de diffraction des électrons vint rapidement confirmer cette prédiction. Depuis cette époque, les physiciens ont admis que les systèmes obéissant à la physique quantique sont des objets singuliers qui présentent des propriétés à la fois ondulatoires et corpusculaires. C'est ce qu'il est convenu d'appeler la dualité onde-corpuscule. De plus, il est également admis que

ces caractères sont complémentaires et ne peuvent être observés simultanément.

Dans les premiers modèles quantiques, les ondes en question étaient envisagées comme des ondes classiques de l'espace physique. Mais il est apparu dès la fin des années 1920 que les ondes, solutions d'une équation fondamentale découverte par l'Autrichien Erwin Schrödinger, représentaient en fait des densités de probabilité de présence et n'avaient donc qu'un sens statistique. Pour cette raison, les ondes quantiques paraissent n'avoir aucun équivalent classique.

Telle est la situation dans l'interprétation actuelle de la mécanique quantique. Elle diffère fortement de ce qu'avait envisagé de Broglie dans son ancien modèle dit de l'« onde pilote » ou de la « double solution » (voir l'encadré page 104). De Broglie a supposé que chaque particule est dynamiquement associée à une onde réelle de l'espace physique qui contribue à son guidage. Dans ce modèle, l'onde solution de l'équation de Schrödinger conserve son rôle de représentation statistique. Toutefois, aucune expérience, ni classique ni quantique, n'avait jusqu'à présent permis d'observer directement le guidage d'une particule par une onde.

Or c'est un tel système que nous avons découvert dans une expérience impliquant des gouttes de liquide. Nous allons d'abord montrer comment il est possible d'obtenir un objet qui associe une onde et une particule et où l'onde guide la particule

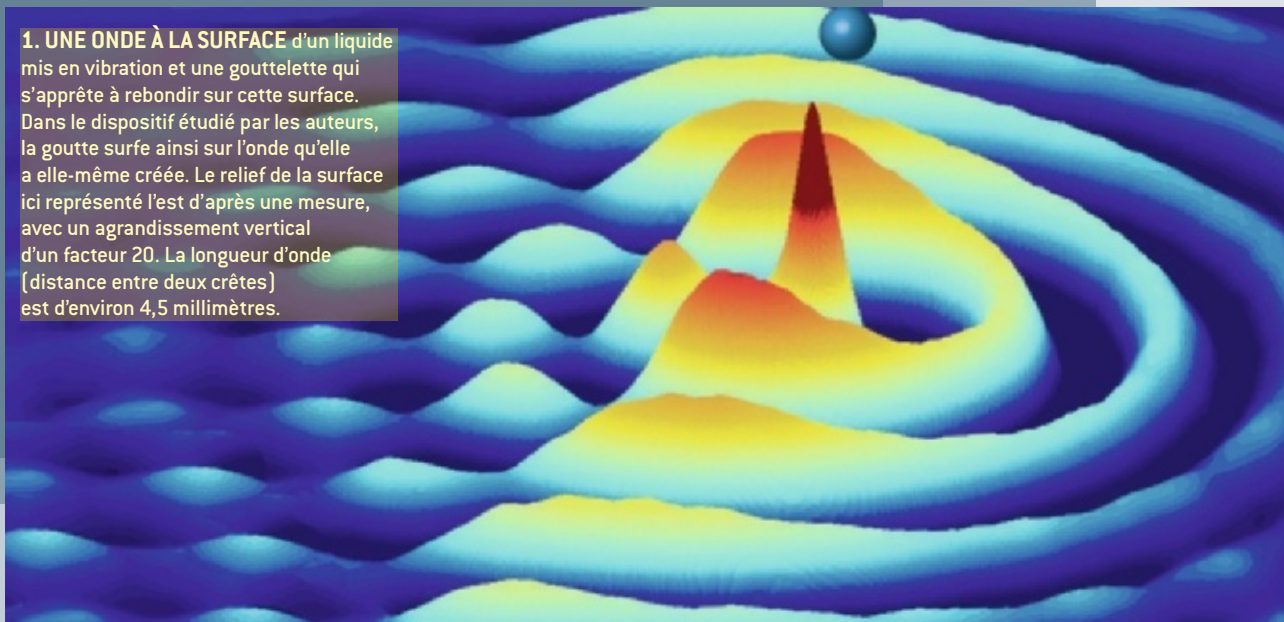
(ou la « pilote »). Dans la seconde partie, on montrera que les propriétés dynamiques de cet objet, telles que diverses expériences les révèlent, manifestent une forme de dualité onde-corpuscule que l'on peut comparer à la dualité quantique.

Le « marcheur » : une goutte et son onde

Le premier germe de cette expérience est né en 2004 d'un projet de troisième année de licence à l'Université Paris Diderot. C'est un excellent exemple du bénéfice que peuvent tirer les enseignants-chercheurs de leur activité d'enseignement. Nous avons proposé à un étudiant, Charles-Henri Gautier, d'étudier expérimentalement la possibilité de non-coalescence d'une goutte liquide (de l'huile de silicone) sur un substrat du même fluide.

Dans les conditions habituelles, une goutte liquide déposée à la surface du même liquide disparaît en quelques dixièmes de seconde. C'est le temps nécessaire à la rupture du film d'air interstitiel. Lors de ce projet, nous nous sommes aperçus que cette coalescence peut être inhibée si la surface du substrat vibre verticalement (voir l'encadré page 102). Lorsque l'accélération due à l'oscillation est légèrement supérieure à celle de la pesanteur, la goutte sautille sur la surface ; ce mouvement permet au film d'air qui la sépare du substrat de se renouveler à chaque oscillation. On peut ainsi maintenir

1. UNE ONDE À LA SURFACE d'un liquide mis en vibration et une gouttelette qui s'apprête à rebondir sur cette surface. Dans le dispositif étudié par les auteurs, la goutte surfe ainsi sur l'onde qu'elle a elle-même créée. Le relief de la surface ici représenté l'est d'après une mesure, avec un agrandissement vertical d'un facteur 20. La longueur d'onde [distance entre deux crêtes] est d'environ 4,5 millimètres.



Toutes les illustrations sont des auteurs

une goutte pendant un temps illimité dans une sorte de lévitation oscillante sur la surface liquide.

Lorsque l'enseignement s'est achevé, nous avons poursuivi cette expérience dans nos laboratoires et une deuxième surprise nous y attendait. En augmentant l'amplitude de l'oscillation verticale et avec des fluides moins visqueux, nous avons vu les gouttes rebondissantes d'un diamètre millimétrique se mettre spontanément en mouvement sur la surface du fluide et y « marcher » à une vitesse de l'ordre du centimètre par seconde. Nous nous sommes rapidement aperçus que cet effet était directement lié aux ondes de surface créées sur le liquide par le rebond périodique de la goutte.

Des rebonds sur des pentes

Pour comprendre ce qui se passe aux grandes amplitudes, il faut se souvenir que si l'on fait vibrer un liquide verticalement avec une amplitude suffisante, sa surface se déstabilise spontanément pour se couvrir d'ondes stationnaires ayant une fréquence moitié de la fréquence de forçage. C'est l'instabilité dite de Faraday, celui-ci l'ayant décrite pour la première fois en 1831 (voir l'encadré page 102).

Dans nos expériences, les accélérations verticales sont toujours inférieures au seuil de cette instabilité et la surface du fluide est donc plane en l'absence de goutte. Le

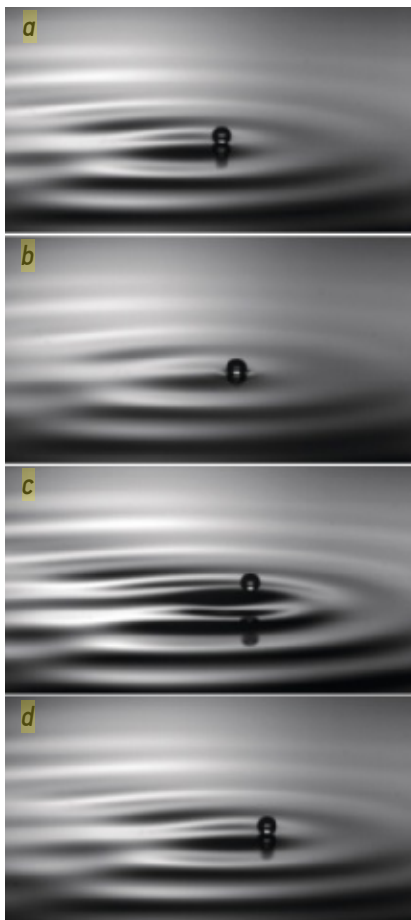
phénomène de marche se produit lorsque l'amplitude de l'oscillation imposée est très voisine de celle pour laquelle l'instabilité de Faraday apparaîtrait. La perturbation due à la présence de la goutte rebondissante suffit alors à déclencher localement des ondes de Faraday qui ne sont que très faiblement amorties, en un temps caractéristique qui dépend de l'écart au seuil. Ainsi, chaque choc de la goutte crée un ensemble d'ondes concentriques stationnaires centré sur le point d'impact.

Dans ces conditions, les ondes créées par les rebonds successifs forment, sous la goutte, une protubérance de plus en plus importante à mesure que l'on augmente l'excitation. Au-delà d'un certain seuil, cette situation devient instable et la goutte finit par se décaler légèrement. Elle vient ainsi rebondir sur la pente de cette protubérance centrale (voir les figures 1 et 2). Ce choc sur une surface localement inclinée donne à la goutte une petite impulsion horizontale. Le mouvement est ensuite entretenu simplement par itération à chaque choc. Le mouvement d'une goutte isolée atteint ainsi un régime stationnaire où chaque cycle de rebond est identique au précédent. Comme nous l'avons montré avec Suzie Protière et Arezki Boudaoud en 2005, la goutte devient ainsi autopropulsée : elle « surfe » sur sa propre onde à une vitesse de l'ordre du dixième de la vitesse des ondes.

Le « marcheur », nom que nous donnons à l'entité formée de la goutte et de son onde, est un objet dont la dynamique n'existe que

L'ESSENTIEL

- ✓ Il est possible de faire rebondir une petite goutte liquide sur un bain que l'on fait vibrer, et cela aussi longtemps que l'on veut.
- ✓ Le système formé de la goutte et de l'onde sur laquelle elle rebondit se déplace : c'est un « marcheur ».
- ✓ Le comportement de tels marcheurs reproduit des phénomènes qui étaient jusqu'ici caractéristiques de la mécanique quantique.
- ✓ La découverte de ce système insolite renouvelle le débat sur l'interprétation de la mécanique quantique.



2. QUATRE PHOTOGRAPHIES successives d'un marcheur vu de côté. Les photographies *a* et *d* ont été prises au moment où la goutte touche le liquide sur la surface inclinée de la protubérance centrale de l'onde créée par les rebonds précédents.

par l'association de l'onde et de la particule. Si la goutte fusionne avec le bain, l'onde s'évanouit. À l'inverse, si les ondes disparaissent ou sont suffisamment amorties, la goutte s'arrête. C'est donc un objet intrinsèquement dual : les ondes n'existent pas sans la goutte et cette dernière ne peut se déplacer sans les ondes qu'elle engendre. C'est, à notre connaissance, le seul objet présentant une structure dynamique duale régie par des lois classiques.

L'apparition d'une forme de dualité dans ce monde macroscopique nous a tout naturellement conduits à envisager des expériences analogues aux expériences fondatrices de la mécanique quantique, où la dualité onde-corpuscule joue un rôle central. Nous allons nous intéresser ici à deux phénomènes caractéristiques du monde quantique : l'incertitude, telle qu'elle apparaît dans les inégalités ou relations d'incertitude de Heisenberg (qui stipulent que l'on ne peut déterminer simultanément la position et l'impulsion d'une particule) et la quantification.

Des interférences... au goutte-à-goutte

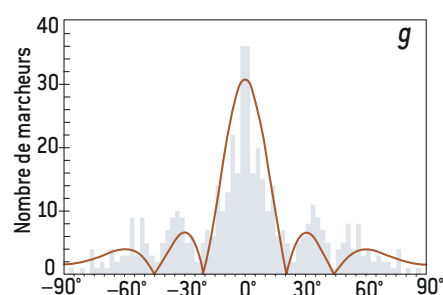
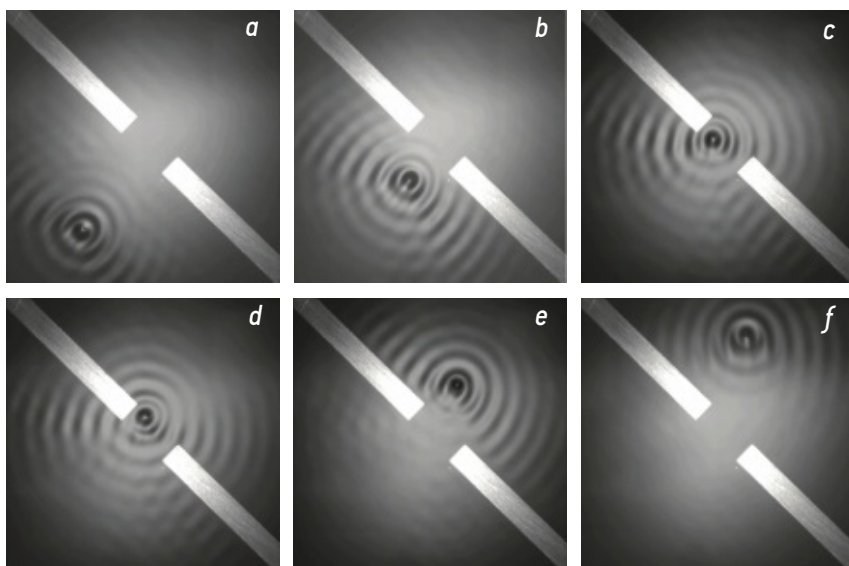
Historiquement, les observations de figures de diffraction et d'interférences ont constitué un argument déterminant en faveur de la nature ondulatoire de la lumière. Les expériences réalisées par l'Anglais Thomas Young vers 1802 sont parmi les plus célèbres. Une onde lumineuse plane et monochromatique arrive sur un écran opaque percé d'une ou de deux fentes de faible largeur (c'est-à-dire de l'ordre de quel-

ques longueurs d'onde). Après passage à travers une fente unique, on observe que la lumière est diffractée, c'est-à-dire qu'une dispersion de sa direction de propagation est apparue. Avec deux fentes, cette dispersion est périodique : des zones alternativement claires et sombres sont observées ; ce sont les franges d'interférences. Ces observations ont été des preuves décisives de la nature ondulatoire de la lumière.

De telles expériences ont été reprises au début du XX^e siècle, lorsque l'hypothèse des photons a vu le jour. On se demandait en effet ce qui se passerait dans des conditions de très faible flux lumineux, telles qu'un seul photon soit présent dans le système à chaque instant. Ces expériences, initialement réalisées avec des photons, ont été reproduites depuis, avec les mêmes résultats, pour des particules massives – électrons, atomes et même molécules.

On sait aujourd'hui détecter de telles particules une par une. Sur l'écran d'observation derrière la fente, on voit les points d'impact des particules successives, chacune paraissant avoir subi une déviation aléatoire. Toutefois, les résultats cumulés révèlent une figure de diffraction. Celle-ci émerge donc de la répartition statistique de la déviation d'un grand nombre de particules individuelles.

Dans le cas de deux fentes, on observe un comportement similaire, les impacts se répartissant comme sur une figure d'interférence. Cela signifierait qu'étrangement, chaque particule est passée à travers les deux fentes. Il est possible de faire une mesure spécifique pour savoir par où passe une particule donnée. On détecte alors



3. CETTE SÉQUENCE DE CLICHÉS (*a-f*) montre la diffraction d'un marcheur lors de son passage à travers une fente. L'écran est formé par une barrière sous-marine, visible en clair. La trajectoire du marcheur après son passage semble aléatoire, mais, en répétant l'expérience, on constate que la répartition statistique des angles de déviation du marcheur est comparable au profil d'amplitude résultant de la diffraction d'une onde plane par une fente (*g*).