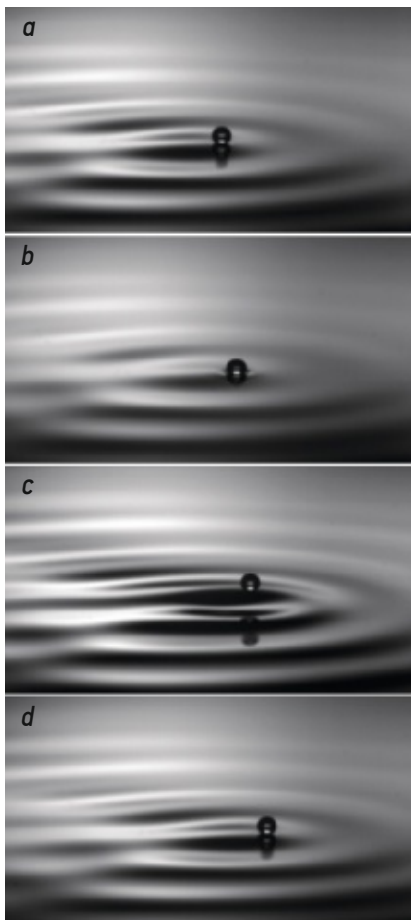




2. QUATRE PHOTOGRAPHIES successives d'un marcheur vu de côté. Les photographies *a* et *d* ont été prises au moment où la goutte touche le liquide sur la surface inclinée de la protubérance centrale de l'onde créée par les rebonds précédents.

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

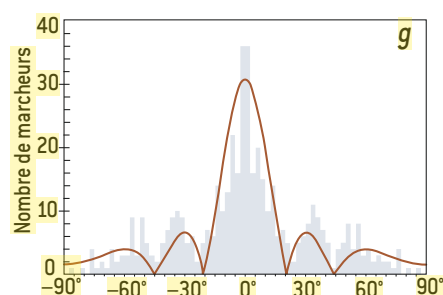
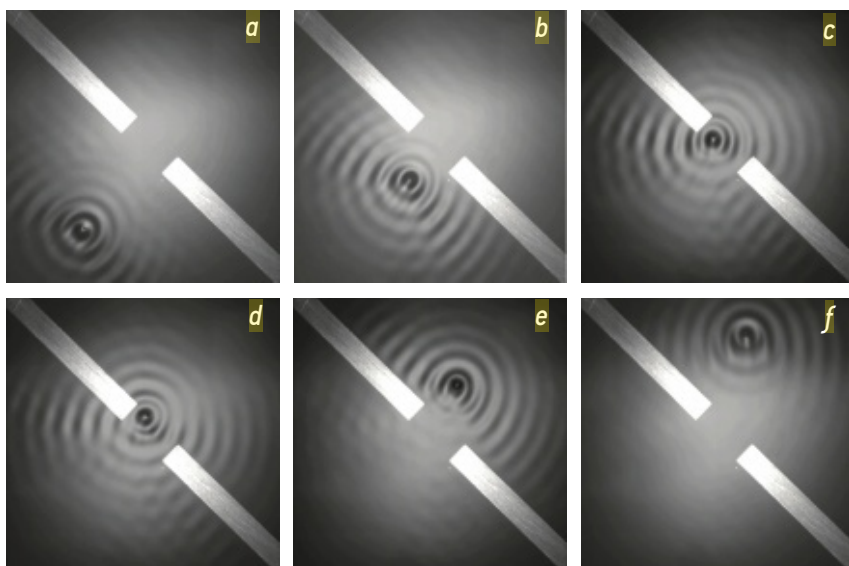
Historiquement, les observations de figures de diffraction et d'interférences ont constitué un argument déterminant en faveur de la nature ondulatoire de la lumière. Les expériences réalisées par l'Anglais Thomas Young vers 1802 sont parmi les plus célèbres. Une onde lumineuse plane et monochromatique 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



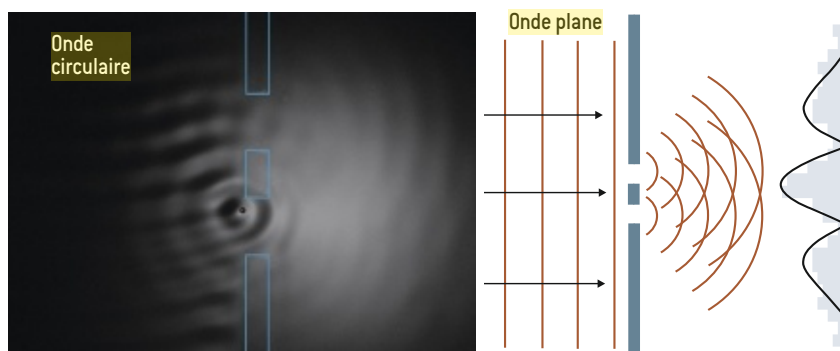
3. CETTE SÉQUENCE DE CLICHÉS (*a-f*) montre la diffraction d'un marcheur lors de son passage à travers une fente. L'écran est formé par une barrière sous-marine, visible en clair. La trajectoire du marcheur après son passage semble aléatoire, mais, en répétant l'expérience, on constate que la répartition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

son passage par l'une des deux fentes. Toutefois, une telle mesure détruit la figure d'interférence. Ainsi, selon la mesure qu'on choisit de faire, on peut déterminer par quelle fente la particule est passée, auquel cas les interférences disparaissent, ou l'ignorer et observer, par accumulation, la figure d'interférence. C'est l'un des paradoxes centraux de la mécanique quantique. Richard Feynman, dans son cours de physique quantique, écrit à propos de ces expériences d'interférence à faible flux : « Dans ce chapitre, nous traiterons immédiatement de l'élément de base du comportement mystérieux sous sa forme la plus étrange. Nous choisissons d'examiner un phénomène qu'il est impossible, absolument impossible, d'expliquer de manière classique et qui est au cœur de la mécanique quantique. Il contient en fait le seul mystère. »

Cette situation nous a fortement incités à tenter une expérience similaire avec des marcheurs, en les faisant passer un par un à travers une paroi percée d'une ou deux ouvertures faisant office de fentes (voir les figures 3 et 4). On observe que la trajectoire d'un marcheur qui passe par une paroi à une fente est déviée. On pourrait penser qu'il existe une corrélation entre l'angle de déviation après passage par la fente et le paramètre d'impact (l'endroit précis du passage) dans la fente.

Les mesures montrent en fait que cette déviation est aléatoire. Le même marcheur, en traversant la fente au même endroit, peut être dévié soit à gauche, soit à droite. Lorsqu'on répète l'expérience de nombreuses fois, on obtient le comportement statistique, traduit par l'histogramme des déviations pour des valeurs du paramètre d'impact réparties à peu près uniformément (voir la figure 3g). La plupart des marcheurs sont répartis dans un lobe central de largeur angulaire λ_F/L , entouré de pics secondaires (λ_F étant la longueur d'onde des ondes de Faraday et L la largeur de la fente). L'histogramme obtenu correspond fidèlement à la figure de diffraction d'une onde plane de longueur d'onde λ_F traversant une fente de largeur L .

On peut aussi réaliser l'équivalent de l'expérience des fentes de Young avec une paroi munie de deux ouvertures (voir la figure 4). L'histogramme des déviations observées correspond maintenant à la figure d'interférence d'une onde plane de longueur d'onde λ_F traversant deux fentes de largeur L séparées d'une distance d . Ce résultat ressemble étonnamment au résultat quanti-



4. L'EXPÉRIENCE DES FENTES DE YOUNG, classique avec la lumière, peut aussi être effectuée avec des marcheurs. Le cliché montre ainsi un marcheur qui s'approche des deux fentes. On peut noter que sa trajectoire a déjà été déviée par les ondes réfléchies sur les obstacles. On voit aussi que les ondes de la surface du liquide traversent les deux fentes. Comme pour le passage à travers une seule ouverture, la distribution statistique des déviations de la goutte (en gris sur le schéma) est la même que la figure d'interférence (courbe noire) créée par une onde incidente plane. On remarque que l'onde (plane) qui reproduit la distribution statistique est entièrement différente de celle (à peu près circulaire) qui accompagne la goutte dans une trajectoire particulière.

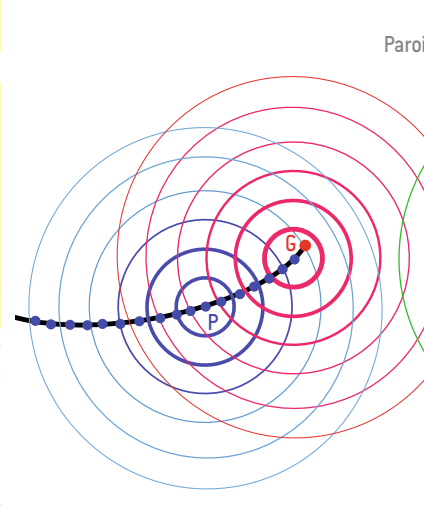
que. Remarquons toutefois qu'ici, pour chaque réalisation individuelle, la fente par laquelle est passée la goutte est connue et, évidemment, unique. Néanmoins, l'onde associée à la goutte traverse les deux fentes. C'est par cet intermédiaire que la trajectoire de la goutte qui traverse une fente est sensible à la présence de l'autre fente.

Les gouttes ont une bonne mémoire

Dans les expériences précédentes, les trajectoires individuelles à proximité des fentes sont complexes et résultent de l'interaction, *via* les ondes, du marcheur avec son environnement.

De façon générale, le champ d'onde présent à la surface du liquide est toujours complexe parce que les ondes créées à chaque collision de la goutte avec la surface ne s'atténuent que très lentement. On peut comprendre cet effet en considérant d'abord un marcheur libre situé loin de toute paroi. Un tel marcheur a une trajectoire rectiligne. Son champ d'onde présente une structure d'interférence complexe, qui résulte de la superposition de toutes les ondes de Faraday ayant été engendrées lors des rebonds successifs de la goutte (voir la figure 5). Les simulations numériques ont permis de reproduire cet effet avec précision.

Le point crucial est que ce champ d'onde dépend de la trajectoire passée de la goutte. Cette caractéristique, que nous dénomons « mémoire de chemin », est à l'origine de la spécificité de la dynamique du marcheur. De plus, il est possible de



5. LA « MÉMOIRE DE CHEMIN » est responsable de la complexité du champ d'onde. À un instant donné, où la goutte se trouve en G, la déformation de la surface du liquide résulte de la superposition des ondes circulaires stationnaires engendrées en tous les points que la goutte a récemment visités (points bleus). On n'a représenté ici que l'onde créée lors du choc le plus récent (en rouge) et une des ondes antérieures (celle qui avait été produite en P, en bleu). La « profondeur » de la mémoire, le nombre de sources anciennes qui contribuent au guidage de la goutte, croît quand on se rapproche du seuil de l'instabilité de Faraday et que l'atténuation des ondes diminue. Enfin, à proximité d'une paroi s'ajoutent des ondes réfléchies (en vert).