



G. Casanova, tous droits réservés

5. UN MASCARET DANS LA BAIE DE TURNAGAIN, EN ALASKA. Derrière le front du mascaret, engendré par la marée, on voit de nombreuses vaguelettes secondaires, les « éteules ». La compréhension de ce phénomène, comme de beaucoup d'autres dans le domaine de la physique des vagues, est encore imparfaite.

L'AUTEUR



David LANNES, directeur de recherche au CNRS, travaille au Département mathématiques et applications de l'École normale supérieure, à Paris.

✓ BIBLIOGRAPHIE

B. Alvarez-Samaniego et D. Lannes, *Large time existence for 3D water-waves and asymptotics*, *Inventiones Mathematicae*, vol. 171(3), pp. 485-541, 2008.

A. D. D. Craik, *The origins of water wave theory*, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 36, pp. 1-28, 2004.

O. Darrigol, *The spirited horse, the engineer, and the mathematician : Water waves in nineteenth-century hydrodynamics*, *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 58, pp. 21-95, 2003.

la description mathématique des vagues : dispersion, non-linéarité, rôle de la pression, distinction eau profonde/peu profonde, etc. Quels sont les enjeux des recherches mathématiques poursuivies aujourd'hui sur ce domaine ?

L'une des principales objections aux différents modèles mathématiques présentés ici est que l'on est en droit de remettre en doute leurs hypothèses, par exemple la nature principalement hydrostatique de la pression. Le développement de nouveaux outils mathématiques a permis depuis la fin du XX^e siècle d'étudier les équations des vagues complètes, c'est-à-dire sans faire d'hypothèses simplificatrices sur la pression ou l'amplitude des vagues par exemple.

La première étape est de montrer que, sur un certain intervalle de temps au moins, les équations ont bien des solutions ! On doit pour cela trouver un cadre fonctionnel (un ensemble de fonctions vérifiant certaines propriétés) adapté. Par exemple, on peut imposer que la paramétrisation de la surface soit une fonction deux fois dérivable en temps et en espace. Le choix du cadre fonctionnel est beaucoup plus délicat pour le potentiel des vitesses : ce dernier est en effet défini dans un domaine fluide qui bouge au cours du temps, et qui est de plus la principale inconnue du problème. Il faut donc se ramener à un espace fonctionnel « fixe ». Les mathématiciens disposent pour ce faire de plusieurs techniques.

Une fois le cadre fonctionnel choisi, on peut l'utiliser pour construire une suite de solutions approchées que l'on veut faire converger vers une solution exacte des équations. La difficulté est alors de gérer tous les phénomènes pouvant faire sortir la solution du cadre fonctionnel choisi. Par exemple, si l'on prend un cadre fonctionnel défini par les fonctions deux fois dérivables, les opérations de dérivation font « sortir » du cadre fonctionnel : la dérivée d'une telle fonction n'est pas forcément deux fois dérivable. Pour montrer que l'on reste dans un même cadre fonctionnel, il faut donc prouver que tous les mécanismes qui, à l'instar de la dérivation, font sortir de ce cadre ont des effets qui se neutralisent mutuellement.

Une fois la solution construite, on s'intéresse à la description de ses propriétés. Par exemple, comment se comporte-t-elle en eau profonde, en eau peu profonde ? Pour cela, on remarque que la solution construite dépend de plusieurs paramètres (la profondeur par exemple), et on essaye de décrire la dépendance de la solution en ces paramètres : c'est « l'analyse asymptotique » de la solution.

Maintes questions restent à explorer

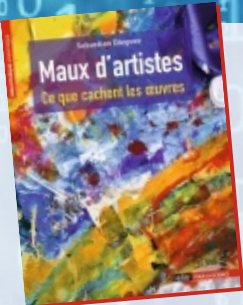
Cette analyse rigoureuse permet de retrouver les modèles décrits plus haut et, surtout, de bien déterminer leur domaine de validité. Elle permet aussi de trouver de nouveaux modèles décrivant précisément certains phénomènes plus compliqués que les ondes solitaires de Russell. Pour citer quelques problématiques actuelles : quel est le rôle de la dispersion sur l'amplitude maximale d'un tsunami ? Sur les éteules (vaguelettes secondaires) des mascarets ? Par quels mécanismes les courants naissent-ils en milieu côtier ? Comment prévoir avec précision les zones de déferlement des vagues ? Quelles sont les zones menacées en cas de vagues de grande amplitude (tempête) ?

Dictées par des préoccupations environnementales évidentes, ces questions soulèvent des difficultés mathématiques considérables. Pour plusieurs de ces phénomènes, nous sommes encore comme Russell devant ses « ondes solitaires », capables d'observations assez précises, mais impuissants à fournir une théorie susceptible de les expliquer et, surtout, de les prévoir correctement. ■

■ POUR LA

La librairie SCIENCE

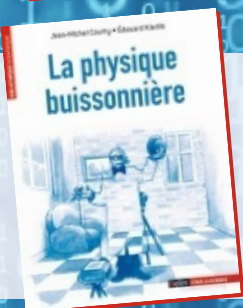
Le savoir scientifique au fil des pages...



Maux d'artistes ■ Sebastian Dieguez

Existe-t-il des liens cachés entre une œuvre d'art – une peinture, une sculpture, une composition musicale ou une œuvre littéraire – et une maladie de l'esprit que présentait son auteur ? Examinant divers chefs-d'œuvre avec un regard de neuropsychologue, Sebastian Dieguez analyse plus d'une vingtaine d'œuvres de Dostoïevski, Monet, De Chirico, Proust, Van Gogh, etc.

176 pages • 25 euros • ISBN 978-2-8424-5101-1



La physique buissonnière ■ Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

Une plante plus rapide qu'une mouche, un tuyau qui parle, une cape qui rend invisible, etc. La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique, les auteurs vous invitent à une promenade sur des chemins de traverse pour comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • ISBN 978-2-8424-5105-9

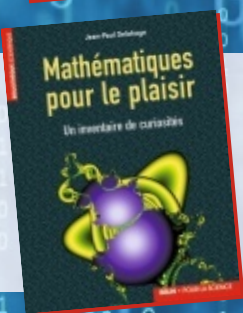


NOUVEAU

La couleur dans tous ses éclats ■ Bernard Valeur

Comment percevons-nous les couleurs ? Pourquoi la matière émet-elle des lumières colorées ? Qu'est-ce que le jaune de Naples, le bleu outremer ou le vert Milori ? La couleur n'a pas fini de nous étonner. Voilà l'occasion de parcourir ses mystères en cinquante sujets, chacun traité en une double page illustrée pour mieux dévoiler les beautés de la couleur.

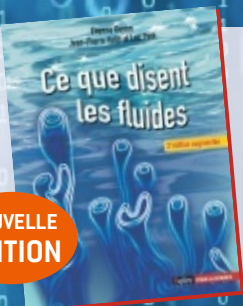
128 pages • 22,50 euros • ISBN 978-2-7011-5876-1



Mathématiques pour le plaisir ■ Jean-Paul Delahaye

Les mathématiques ne se réduisent pas – heureusement – à ce qu'on nous en apprend à l'école. Partout présentes, elles sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique. Dans cet ouvrage, découvrez pourquoi les mathématiques sont faciles et comment s'y adonner est un plaisir.

208 pages • 25 euros • ISBN 978-2-8424-5104-2



NOUVELLE ÉDITION

Ce que disent les fluides ■ Étienne Guyon, Jean-Pierre Hulin, Luc Petit

Ce livre invite le lecteur à découvrir la physique des fluides à travers tourbillons, houle, turbulences, avalanches, mascarets, écoulements sanguins, etc.

Cette deuxième édition incontournable pour tous les passionnés de science a été étoffée de plusieurs sujets inédits.

176 pages • 25 euros • 978-2-7011-5725-2

Des livres à découvrir en librairie et sur
www.pourlascience.fr/librairie

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

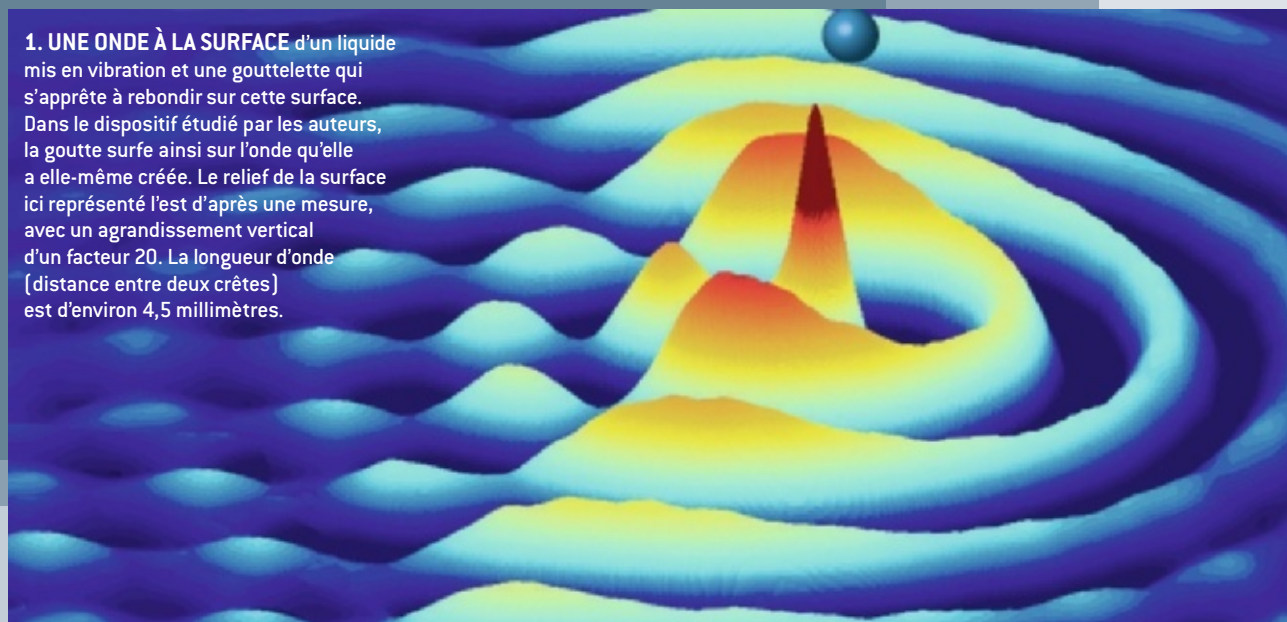
(ou la « pilote »). Dans la seconde partie, on montrera que les propriétés dynamiques de cet objet, telles que diverses expériences les révèlent, manifestent une forme de dualité onde-corpuscule que l'on peut comparer à la dualité quantique.

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

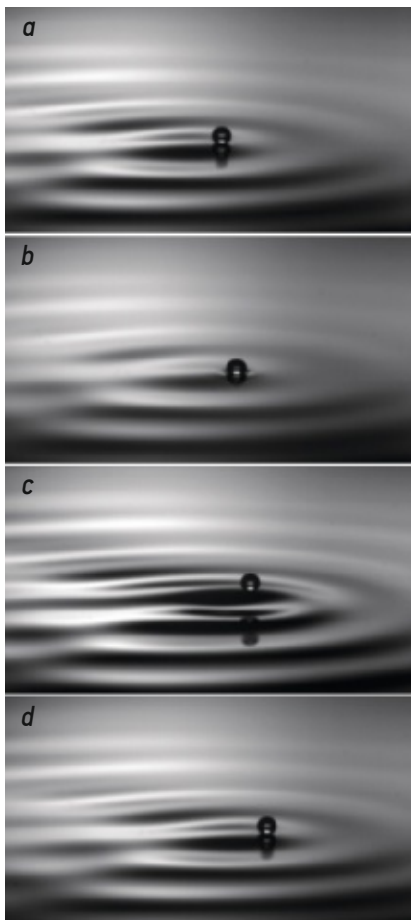
phénomène de marche se produit lorsque l'amplitude de l'oscillation imposée est très voisine de celle pour laquelle l'instabilité de Faraday apparaîtrait. La perturbation due à la présence de la goutte rebondissante suffit alors à déclencher localement des ondes de Faraday qui ne sont que très faiblement 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

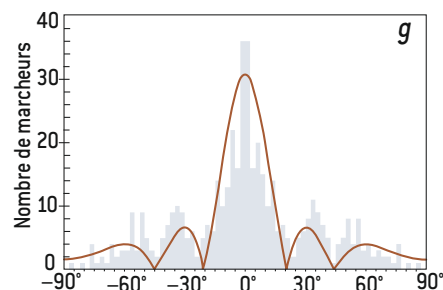
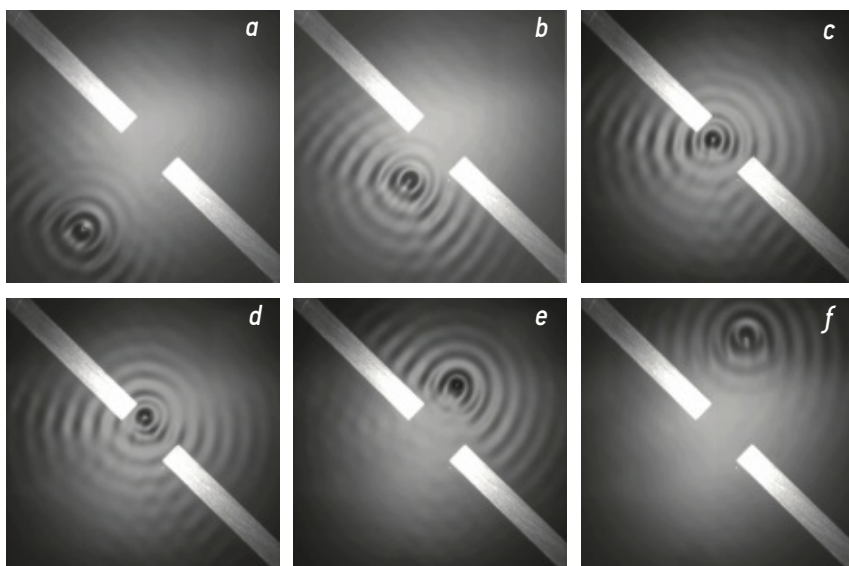
Historiquement, les observations de figures de diffraction et d'interférences ont constitué un argument déterminant en faveur de la nature ondulatoire de la lumière. Les expériences réalisées par l'Anglais Thomas Young vers 1802 sont parmi les plus célèbres. Une onde lumineuse plane et monochromatique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



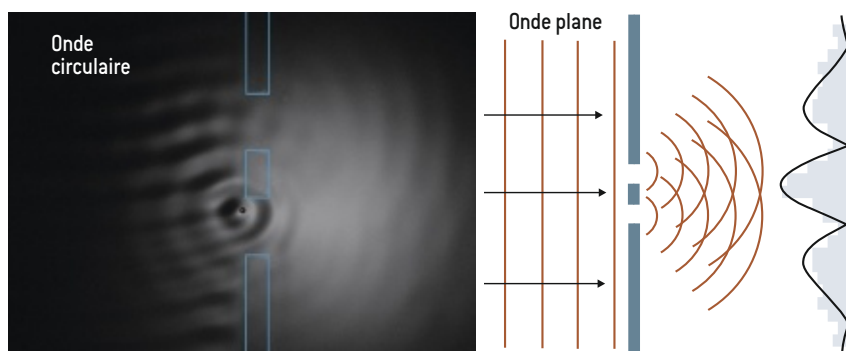
3. CETTE SÉQUENCE DE CLICHÉS (*a-f*) montre la diffraction d'un marcheur lors de son passage à travers une fente. L'écran est formé par une barrière sous-marine, visible en clair. La trajectoire du marcheur après son passage semble aléatoire, mais, en répétant l'expérience, on constate que la répartition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

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.

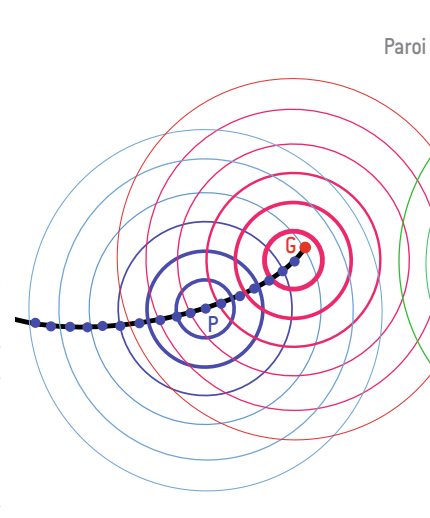
que. Remarquons toutefois qu'ici, pour chaque réalisation individuelle, la fente par laquelle est passée la goutte est connue et, évidemment, unique. Néanmoins, l'onde associée à la goutte traverse les deux fentes. C'est par cet intermédiaire que la trajectoire de la goutte qui traverse une fente est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

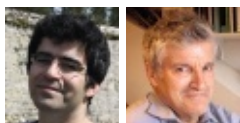
De façon générale, le champ d'onde présent à la surface du liquide est toujours complexe parce que les ondes créées à chaque collision de la goutte avec la surface ne s'atténuent que très lentement. On peut comprendre cet effet en considérant d'abord un marcheur libre situé loin de toute paroi. Un tel 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*).

LES AUTEURS



Emmanuel FORT est maître de conférences à l'Université Paris-Diderot et travaille à l'Institut Langevin de l'ESPCI ParisTech.

Yves COUDER est professeur émérite à l'Université Paris-Diderot et y poursuit ses recherches au Laboratoire Matière et systèmes complexes.

changer expérimentalement la profondeur temporelle de cette mémoire. En effet, celle-ci dépend directement de l'écart au seuil de l'instabilité de Faraday. Ainsi, en augmentant la vibration du bain, on obtient des champs d'onde plus complexes résultant d'un nombre croissant d'ondes produites par les chocs passés de la goutte.

Tant que le marcheur est libre de toute contrainte, la trajectoire de la goutte reste rectiligne. La situation se complique en présence d'obstacles. Dans ce cas, les ondes reviennent vers le marcheur et influent sur son mouvement. Un peu comme des chauves-souris ou des dauphins qui analysent les échos ultrasonores, le marcheur réagit aux obstacles par une interaction à distance. À proximité d'un obstacle, la pente locale sur laquelle rebondit la goutte résulte de la superposition, au point d'impact, des ondes issues directement des chocs précédents et des ondes émises antérieurement et qui se sont réfléchies sur les parois. L'impulsion reçue à chaque rebond est alors déterminée par la superposition de l'ensemble de ces ondes, superposition qui intègre

de façon ondulatoire une information sur l'environnement de la goutte.

De plus, cette intégration est itérative. À chaque rebond, la trajectoire de la goutte est modifiée par la superposition, au niveau du point d'impact, de l'ensemble des ondes, réfléchies et directes, émises antérieurement. La déviation élémentaire qui en résulte modifie la position de l'impact suivant, ce qui contribue en retour à modifier le champ d'onde. En d'autres termes, la dynamique du marcheur est pilotée par la distribution spatiale des sources émettrices du passé.

Cette mémoire de chemin peut être considérée comme une forme originale de non-localité spatio-temporelle. Cette non-localité se mue en incertitude dans tous les cas où un confinement est imposé au marcheur. En effet, la dynamique fondée sur la mémoire de chemin conduit dans ce cas à des trajectoires chaotiques. C'est ce qu'on observe en particulier dans les expériences de diffraction. Le passage à travers la fente engendre des trajectoires individuelles complexes et imprévisibles qui sont à l'origine des distributions statistiques observées.

Les résultats précédents nous ont conduits à nous demander aussi quelle structure pouvait avoir le champ d'onde lorsque le mouvement du marcheur est circulaire et quel effet il aurait en retour sur la trajectoire de la goutte.

Expérimentalement, pour qu'une masse suive un mouvement circulaire, il faut lui appliquer une force constante perpendiculaire à sa vitesse. On peut penser à deux types de forces. L'une, la force de Lorentz, est la force magnétique exercée sur une charge en mouvement, l'autre la force de Coriolis qui s'exerce sur un mobile dans un système en rotation.

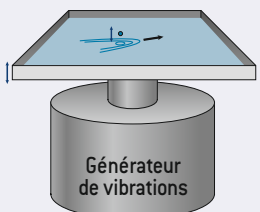
Les mouvements circulaires quantifiés

Nous avons étudié avec Antonin Eddi et Julien Moukhtar, en 2010, le second cas en faisant tourner la cellule expérimentale. Les lois de la physique classique indiquent que la gouttelette, animée d'une vitesse V , devrait avoir dans le repère tournant un mouvement circulaire de rayon $R = V/(2\Omega)$, où Ω est la vitesse angulaire de rotation. C'est bien ce que l'on observe pour un marcheur dont la mémoire de chemin est faible. Une mémoire faible s'obtient lorsque le forçage du système est loin du seuil de l'instabilité de Faraday. En se rapprochant

L'expérience et l'instabilité de Faraday

Dans les expériences décrites dans cet article, une cellule contenant un petit bain d'huile de silicone 20 fois plus visqueuse que l'eau est placée sur un générateur de vibrations (fonctionnant comme un gros haut-parleur). Le liquide est soumis à une accélération verticale comprise entre 0 et $6g$ (où g est l'accélération de la pesanteur) et de fréquence 80 hertz. Lorsque l'accélération dépasse $4,2g$, on observe que toute la surface se couvre d'un réseau d'ondes stationnaires. C'est l'instabilité de Faraday, où les ondes observées résultent d'un « forçage paramétrique » des ondes de surface. Cela signifie que la modulation excitatrice concerne un des paramètres du système, ici la gravité effective.

Une caractéristique du forçage paramétrique (que les enfants utilisent pour augmenter l'amplitude de l'oscillation des balançoires) est que la période du mouvement excité



est double de la période de forçage. À la surface du liquide, on obtient une onde de surface dont la longueur d'onde λ_F correspond à cette période.

Toutes les expériences sont réalisées avec des amplitudes de forçage inférieures au seuil de déclenchement de l'instabilité de Faraday. On dépose sur la surface oscillante des gouttes constituées du même liquide et dont le diamètre est de l'ordre de 0,7 millimètre. Pour des amplitudes de forçage supérieures à g , la goutte rebondit périodiquement sur la surface du liquide sans jamais fusionner avec celui-ci. Lorsque l'amplitude de ce forçage se rapproche de $4,2g$, on constate

deux phénomènes. L'amplitude des rebonds devient telle que la goutte ne touche la surface qu'une période sur deux. Elle a donc désormais la même période que les ondes de Faraday. La goutte devient ainsi un excitateur local efficace qui crée des ondes circulaires stationnaires autour du point d'impact. La goutte rebondit alors sur une protubérance de plus en plus importante.

Cette situation instable induit une mise en mouvement de la goutte. Le rebond devient asymétrique et la goutte s'autopropulse. Le temps de déclin des ondes excitées par les chocs précédents est un paramètre qui contrôle la distance au seuil de l'instabilité de Faraday : typiquement, lorsqu'on applique une accélération de $3,8g$, le champ d'onde résulte de la superposition des 10 derniers rebonds, alors que pour $4,16g$, le champ intègre la mémoire des 100 derniers chocs.

de ce seuil, le temps de persistance des ondes croît, la mémoire du marcheur augmente et le champ d'onde devient plus complexe et plus étendu. Dans ces conditions, on constate que les rayons des orbites n'évoluent plus de façon continue : quand on augmente la vitesse de rotation, le rayon décroît par sauts entre certaines valeurs successives (voir la figure 6). Ces valeurs discrètes peuvent être indexées par un entier $n=0, 1, 2, \dots$, le mode $n=0$ correspondant à l'orbite la plus serrée (obtenue pour des vitesses de rotation élevées).

Ainsi, les orbites possibles de la gouttelette sont spontanément quantifiées. On peut montrer que cette quantification résulte directement de la mémoire de chemin. Le champ d'onde est ici créé par un ensemble de sources distribuées sur un cercle. Selon le diamètre de celui-ci, une force supplémentaire, radiale, apparaît. Induite par le champ d'onde, cette force ajoute une contribution centrifuge ou centripète à la force de Coriolis pour créer les niveaux discrets observés.

Existe-t-il un lien avec la mécanique quantique ?

Il existe une analogie formelle entre la force de Lorentz et la force de Coriolis. Les deux forces conduisent à des mouvements orbitaux, la vitesse de rotation du plateau jouant dans le second cas un rôle similaire à la force magnétique. Par ailleurs, en mécanique quantique, on sait que la condition dite de Bohr-Sommerfeld, selon laquelle la longueur de l'orbite est un multiple de la longueur d'onde, implique que les orbites d'un électron soumis à un champ magnétique, dites orbites de Landau, soient quantifiées. On peut se demander s'il existe un lien entre la quantification de Landau et celle observée avec les gouttes.

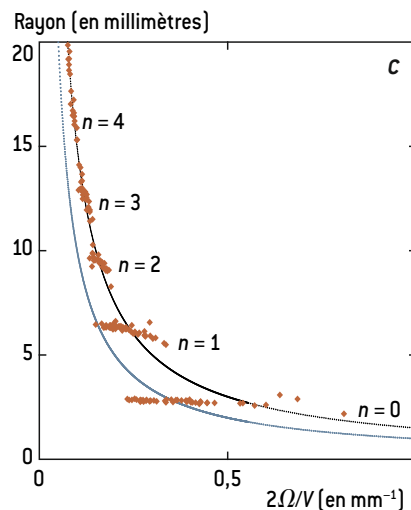
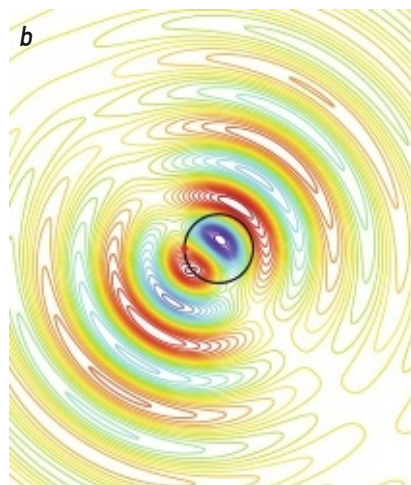
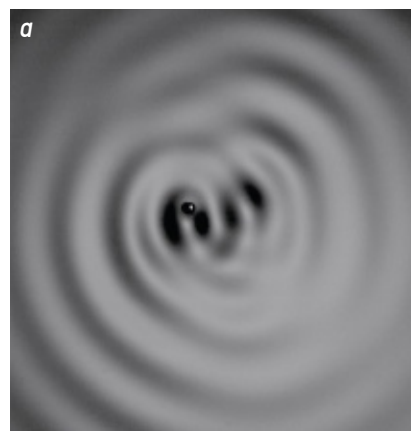
La question peut paraître stupide puisque, dans le cas quantique, la quantification est reliée à la constante de Planck $\hbar$ qui ne joue aucun rôle ici. Mais cette constante n'intervient que dans la détermination de la longueur d'onde de de Broglie λ_{dB} . Pour cette raison, on peut exprimer les diamètres des orbites de Landau directement en fonction de λ_{dB} . De la même façon, les diamètres des orbites des marcheurs sont une fonction de la longueur d'onde de Faraday λ_F . En identifiant ces deux longueurs d'onde, λ_{dB} et λ_F , une ana-

logie surgit entre la quantification en mécanique quantique et celle que nous observons avec les gouttelettes.

Il y a un plaisir esthétique à faire ces expériences. Toutefois, leur intérêt tient à l'évidence à leur relation éventuelle avec la mécanique quantique. De ce point de vue, leur inconvénient est leur très grande distance avec celle-ci. La constante de Planck n'intervient pas dans notre système, qui est par ailleurs fortement dissipatif (l'énergie se dissipe) et entretenu, alors que la situation quantique est non dissipative. En outre, l'onde de surface se propage sur un milieu matériel, un « éther » *a priori* absent en mécanique quantique.

Mais l'intérêt de notre expérience vient aussi principalement de cette distance avec la situation quantique. À l'échelle microscopique, la limitation de Planck s'impose à tous les phénomènes, et c'est pourquoi il est impossible d'effectuer une mesure qui ne perturbe pas radicalement l'objet à mesurer. Dans notre système, de telles mesures intrusives peuvent être également faites et produisent des résultats comparables. Ainsi, la diffraction d'un marcheur est une expérience intrusive qui revient à déterminer en aveugle la position du marcheur dans la direction perpendiculaire à son mouvement. Pour réaliser cette mesure, nous sommes contraints de limiter l'extension transverse de l'onde. Comme on l'a montré, cela conduit, après la mesure, à une indétermination sur la direction de la vitesse. Il s'agit là, *mutatis mutandis*, d'un équivalent classique du principe d'incertitude de Heisenberg.

Par ailleurs, notre système étant macroscopique, son interaction avec la lumière est négligeable et on peut donc l'observer de façon non intrusive. Il est en particulier possible de voir ce qui se passe durant les expériences de diffraction ou d'interférence. À chaque réalisation de l'expérience, on observe que la goutte, à proximité des fentes, suit une trajectoire compliquée. L'onde qui la guide est elle-même complexe et contient de l'information tant sur la trajectoire antérieure que sur l'environnement spatial formé par les obstacles. La situation redevient simple statistiquement : la répétition de l'expérience révèle que la probabilité de déviation dans une direction est donnée par la diffraction ou l'interférence d'une onde plane qui serait passée par les fentes. Néanmoins, cette onde plane n'est jamais visible dans une réalisation donnée (voir la figure 4).



6. LORSQU'ON FAIT TOURNER (à une vitesse angulaire Ω réglable) la cellule contenant le liquide, le marcheur subit une force de Coriolis dans le repère tournant. Cette force perpendiculaire à la vitesse V du marcheur lui fait décrire un mouvement circulaire [photographie en a, simulation numérique en b]. Lorsqu'on augmente la mémoire de chemin, les orbites dont le rayon variait continûment avec la rotation (c, courbe noire) deviennent discrètes [points rouges]. Cela provient d'une force de « quantification » due à la superposition des ondes émises le long de toute la trajectoire circulaire.

Les théories d'ondes pilotes en mécanique quantique

Les expériences avec les « marcheurs » réalisent à échelle macroscopique le guidage d'une particule par une onde. Cette situation est proche de celle qui a été imaginée dans les modèles dits d'onde pilote de la mécanique quantique. Il convient donc de rappeler brièvement l'histoire de ces modèles dits de « de Broglie-Bohm ». Bien que toujours étudiés, ces derniers sont aujourd'hui souvent considérés comme superflus par les spécialistes de la mécanique quantique. L'évolution historique de ces modèles est complexe, mais son examen montre qu'il convient de distinguer les modèles respectivement proposés par Louis de Broglie et par l'Américain David Bohm.

Le modèle de Bohm, proposé en 1952, est actuellement le plus connu. L'onde qui est solution de

l'équation de Schrödinger y joue le rôle de l'onde pilote. On peut, par une transformation mathématique, séparer cette équation en deux parties : une équation qui énonce la continuité des densités de probabilité, et une équation de mouvement qui détermine des trajectoires dans l'espace physique. Toutefois, le point de départ de cette approche étant l'équation de Schrödinger, on obtient seulement un autre aspect des ondes de probabilité. Cette approche associe des trajectoires de particules fictives à des flux de densités de probabilité. Ces particules sont ainsi soumises à un nouveau potentiel, dit potentiel quantique, qui a pour origine la fonction d'onde solution de l'équation de Schrödinger.

Le modèle de Bohm diffère profondément de ce qu'avait envisagé

de Broglie, qui souhaitait à la fois décrire le mouvement de particules individuelles dans l'espace physique et pouvoir en déduire les propriétés statistiques.

Dans des travaux de 1927 repris en 1953, de Broglie propose un modèle de double solution où coexistent deux champs d'onde. Le premier décrit le mouvement de l'objet individuel dans l'espace physique ; c'est un paquet d'ondes ayant en son centre une zone singulière caractérisée par une très grande amplitude et qui équivaut à une particule ponctuelle. Cette singularité est guidée par son paquet d'ondes, qui constitue une onde dite pilote. Cela confère à la dynamique de la singularité des propriétés ondulatoires qui induisent une non-localité spatiale. Ainsi,

dans ce modèle, les singularités (ou particules) peuvent être par exemple déviées et donner (statistiquement) une figure de diffraction ou d'interférence. La deuxième onde considérée par de Broglie est la fonction d'onde décrite par l'équation de Schrödinger. Cette onde, qui n'est pas physique au sens classique, traduit le comportement statistique des objets individuels conformément à l'interprétation usuelle de la mécanique quantique. Elle est associée à un comportement moyen et permet de prédire les propriétés statistiques observées.

Ces idées de de Broglie, comme celles de Bohm, sont toutefois restées marginales, l'approche usuelle paraissant suffire à l'interprétation des données expérimentales.

BIBLIOGRAPHIE

A. Eddi et al., Information stored in Faraday waves : the origin of a path memory, *J. Fluid Mech.*, vol. 674, pp. 433-463, 2011.

E. Fort et al., Path memory induced quantization of classical orbits, *PNAS*, vol. 107, pp. 17515-17520, 2010.

Y. Couder et E. Fort, Single-particle diffraction and interference at a macroscopic scale, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, 154101, 2006.

S. Protière et al., Particle wave association on a fluid interface, *J. Fluid Mech.*, vol. 554, pp. 85-108, 2006.

Y. Couder et al., Walking and orbiting droplets, *Nature*, vol. 437, p. 208, 2005.

L. de Broglie, L'interprétation de la mécanique ondulatoire, *J. de Phys. et le radium*, tome 20, pp. 963-979, 1959.

L. de Broglie, La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement, *J. de Phys. et le radium*, série 6, tome 8, pp. 225-241, 1927.

Nos résultats expérimentaux suggèrent qu'un modèle de « double solution » du type proposé initialement par de Broglie (*voir l'encadré ci-dessus*) peut constituer la face cachée des comportements statistiques quantiques. Dans nos expériences, chaque marcheur individuel est guidé par une onde pilote. Les distributions statistiques obtenues lors de mesures intrusives font émerger des densités de présence possédant un caractère ondulatoire. Néanmoins, à l'échelle de l'expérience avec un marcheur unique, cette onde de densité, qui est l'analogue de l'onde solution de l'équation de Schrödinger, n'est jamais visible directement.

Un débat ancien qui n'est pas clos

Les observations suggèrent l'origine des propriétés statistiques des marcheurs. La dynamique due à l'existence de la mémoire de chemin tend à devenir chaotique dans tout environnement confiné, car cela induit une prolifération des sources secondaires. Le champ d'onde résultant est corrélé à la géométrie locale, dont il tend à exciter les modes propres de vibration. Des résultats préliminaires concernant les densités de probabilité de présence des marcheurs dans des cavités vont d'ailleurs dans ce sens. Ainsi, l'onde pilote peut être à l'origine d'un champ moyen réflé-

tant la géométrie de l'environnement et commun à toutes les réalisations.

La théorie standard de la mécanique quantique, développée par l'école de Copenhague, fournit un formalisme qui permet de prédire avec précision les résultats des mesures dans une très grande variété de situations. La dualité onde-particule y joue un rôle central.

En dépit de son efficacité, cette approche probabiliste de la mécanique quantique garde un caractère singulier. À l'opposé de tous les autres phénomènes de physique statistique et de façon surprenante, elle suppose qu'aucun mécanisme sous-jacent, même complexe, ne peut intervenir au niveau d'une particule individuelle et être responsable de ces comportements probabilistes. C'est précisément ce point d'achoppement qui faisait penser à de Broglie ou Einstein que la théorie quantique était fondamentalement incomplète.

Or il semble qu'aucune approche de la mécanique quantique n'ait envisagé un effet de mémoire. Comme nous l'avons vu, celui-ci induit dans le cas de nos marcheurs une non-localité spatio-temporelle qui est à l'origine d'un principe d'incertitude et d'une quantification. C'est pourquoi nous pensons que le débat ancien sur le caractère incomplet de la mécanique quantique dans son interprétation actuelle n'est pas clos. ■

Entrée libre
→ www.cnrs.fr/entree-matiere

ENTRÉE EN MATIÈRE

Jardins du Trocadéro, du 19 au 30 octobre 2011

Exposition, conférences, animations
Une invitation à explorer la matière



Année internationale de la
CHIMIE
2011



www.cnrs.fr



énergie nucléaire • énergies alternatives



THALES



MAIRIE DE PARIS



Le Point

SCIENCE

Direct Matin

