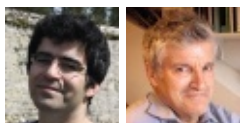


LES AUTEURS



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.

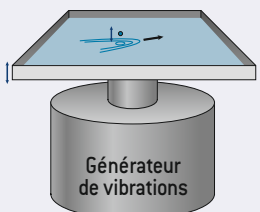
Les résultats précédents nous ont conduits à nous demander aussi quelle structure pouvait avoir le champ d'onde lorsque le mouvement du marcheur est circulaire et quel effet il aurait en retour sur la trajectoire de la goutte.

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.

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.

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

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.

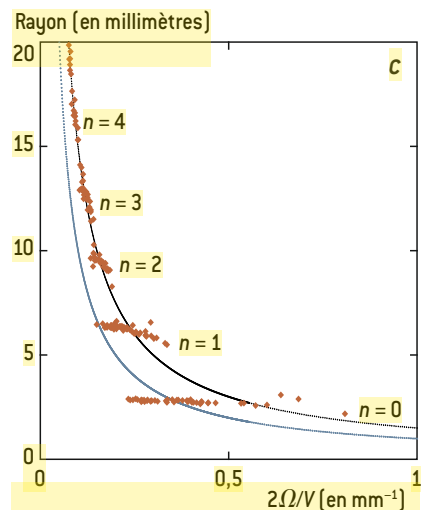
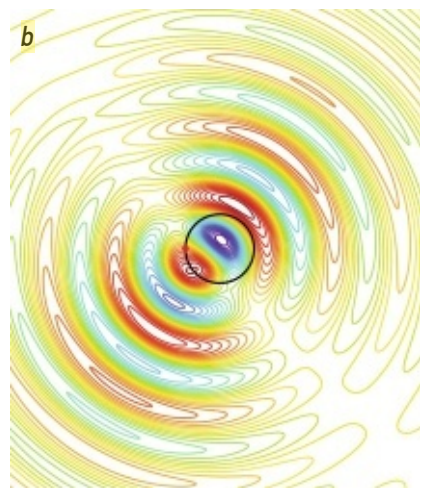
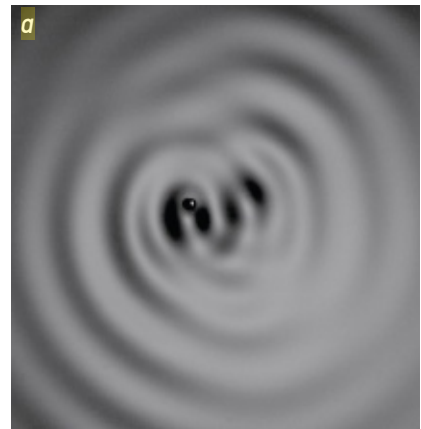
La question peut paraître stupide puisque, dans le cas quantique, la quantification est reliée à la constante de Planck h qui ne joue aucun rôle ici. Mais cette constante n'intervient que dans la détermination de la longueur d'onde de de Broglie λ_{dB} . Pour cette raison, on peut exprimer les diamètres 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.