

LES PARTICULES SURFENT SUR LA VAGUE

LE 1 JUIN 2011 ROUD

Le monde quantique est incommensurable, difficilement compréhensible. Une des théories est qu'un système quantique est une particule "portée" par une onde. Une hypothèse qui pourrait être validée par les expériences de physiciens des liquides français.

La mécanique quantique est le domaine de la physique à la fois le plus mystérieux et le plus popularisé auprès du grand public. Lorsqu'elle a été inventée dans les années 20, ses propriétés mathématiques paraissaient si étranges que de nombreux débats philosophiques ont eu lieu pour comprendre l'implication de cette physique sur la notion de réalité même.

Ce qu'il y a d'étonnant dans la mécanique quantique est qu'elle donne une vision fondamentalement incertaine du monde. Les particules quantiques se comportent tantôt comme une onde, tantôt comme une particule, une observation ne donne pas un résultat déterminé, mais probabiliste.

A cela s'ajoutent des effets bizarres comme le **principe d'incertitude d'Heisenberg**, spécifiant qu'un observateur peut modifier la nature de l'expérience physique simplement en la regardant, ou encore le **paradoxe du chat de Schrödinger** ... Vous avez probablement entendu parler de ces interprétations qui, quoique bien définies mathématiquement, donnent un parfum très ésotérique à la physique quantique et la rendent quelque peu inaccessible au commun des mortels. Faut-il inventer une nouvelle philosophie, une nouvelle vision du monde et de la réalité pour comprendre notre univers ? (Ou notre multivers ?)



D'un point de vue purement scientifique, une école de pensée, dite de **Copenhague**, a fini par s'imposer. C'est en réalité une certaine école du renoncement : fi de ces histoires de dualité onde-particule, il est inutile de se poser des questions sans fins. La formule symbole de cette interprétation est le fameux "*shut-up and calculate*" de Feynmann, i.e. :

“

Ne te pose pas de questions et calcule.

”

L'idée est que le monde quantique reste incommensurable, incompréhensible pour nos cerveaux primitifs d'*homo sapiens*, le monde est tout simplement différent à petite échelle, et

la seule beauté mathématique de l'équation de Schrödinger peut nous permettre de comprendre ce qu'il s'y passe.

Ondes et particules

Einstein (parmi d'autres) n'accepta jamais cette interprétation. Il propose avec **Podolsky** et **Rosen** un argument en 1935, appelé "**paradoxe EPR**", visant à réfuter l'interprétation de Copenhague, théorie dite "non-locale". L'illustration la plus connue de cette non-localité est ce qu'on appelle l'intrication quantique : des particules quantiques semblent pouvoir interagir à très grande distance, comme si la réalité physique d'une particule défiait l'espace en s'étendant en plusieurs endroits simultanément. Einstein pensait que c'était impossible et que des théories locales à "variables cachées" pouvaient tout expliquer.

Dans les années 60, John Bell propose une formulation mathématique de ce paradoxe EPR, les "inégalités de Bell", ouvrant la voie à des tests expérimentaux du paradoxe, réalisés *in fine* pour la première fois par **Alain Aspect**, qui montre effectivement que la mécanique quantique les viole (**10.000 fois plus vite que la lumière**). L'école de Copenhague triomphe : cette violation prouve qu'il n'y a pas de théories locales à variables cachées pouvant rendre compte de la mécanique quantique, et donc qu'il est inutile de tenter de dépasser la froideur mathématique de l'équation de Schrödinger, seule façon de décrire le monde à petite échelle. L'interprétation s'impose définitivement, est enseignée dans les universités, le débat semble clos (en tous cas pour les non-experts un peu éclairés dans mon genre).

Mais le diable est dans les détails : la violation des inégalités de Bell montre que la mécanique quantique est une théorie "non-locale", comme le veut l'interprétation de Copenhague, mais elle ne montre pas pour autant que l'interprétation de Copenhague est valide (en particulier son aspect purement probabiliste). Or certains physiciens, et pas des moindres, ont continué à travailler sur des théories qui, contrairement à l'interprétation de Copenhague, ont le bon goût d'être **déterministes** et non probabilistes : **De Broglie et Bohm** ont ainsi développé une théorie dite de l'onde porteuse, ou onde guide. On peut résumer en quelques mots cette théorie de la réalité : un système quantique n'est ni une particule, ni une onde mais la conjugaison d'une particule littéralement "portée" par une onde, un peu comme un surfeur sur une vague. Lorsque l'on explore alors les propriétés de la matière, on est tantôt en interaction avec une particule, tantôt en interaction avec l'onde, d'où la fameuse dualité observée en mécanique quantique.

Cette théorie a également le bon goût d'être non-locale : l'onde porteuse s'étend à tout l'univers, et donc on peut interagir avec la particule "à distance" via une action sur sa propre onde porteuse. Elle n'est donc pas nécessairement en contradiction avec les expériences de violation des inégalités de Bell dont on parle ci-dessus. Le plus gros problème, qui hérisse le poil de nombreux physiciens, est cette non-localité, et cette théorie ne s'est pas imposée, trop ésotérique. Ironie de l'histoire, l'un des grands défenseurs de cette théorie n'est autre que John Bell lui-même, l'homme qui par ses travaux a indirectement tué le paradoxe EPR.

Transportons-nous maintenant au début des années 2000. Changeons de domaine : place à la physique de la matière dite "molle", place à cet élément étrange et commun ... l'eau.

(Pour les non-anglophones, une version sous-titrée de cette vidéo est disponible **sur dot sub**)

Grâce aux progrès dans l'acquisition des images, on peut filmer en temps réel ce qui se passe lorsqu'une goutte d'eau tombe sur une surface libre. On observe alors un phénomène tout à fait fascinant dû à la tension de surface (la même propriété physique à l'origine des effets de **capillarité**) : lorsqu'une goutte tombe sur une surface d'eau, elle va pouvoir "rebondir" plusieurs fois sur celle-ci. Au moment des rebonds, elle va en plus créer une petite onde autour d'elle. Au bout du compte, l'énergie se dissipe, la goutte se stabilise à la surface avant de fusionner avec celle-ci. Dans cette petite expérience très simple, notez qu'on a deux ingrédients intéressants : une "particule" (la goutte), et une onde (créée par la goutte qui tombe), l'onde étant bien sûr en interaction avec la particule via les lois de la mécanique des fluides. On n'est pas très loin de l'image de Bohm-De Broglie, le seul "problème" étant la dissipation d'énergie qui entraîne la stabilisation de la goutte et sa fusion avec la surface.

La solution paraît rétrospectivement simple : injecter de l'énergie dans le système

C'est l'idée qu'ont eu **Yves Couder** (de l'université Paris VII) et son équipe : en faisant "vibrer" la surface d'eau, on peut arriver à entretenir le rebond de la goutte, qui sautille *ad vitam aeternam*, générant une onde dans sur la surface de l'eau. Mieux, en ajustant un peu les paramètres, on peut arriver à ce que l'onde soit déphasée par rapport au rebond de la goutte, ce qui a pour conséquence de transformer la goutte rebondissante en goutte voyageuse, "marcheur" allant bien droit. L'onde générée par le rebond est ainsi transformée en "onde porteuse", un peu comme dans la théorie de Bohm-De Broglie ! Encore mieux : si on commence à mettre plusieurs gouttes ensemble, non seulement celles-ci bougent, mais elles vont pouvoir interagir via l'onde se propageant à la surface de l'eau. Une vidéo vaut mieux qu'un long discours :

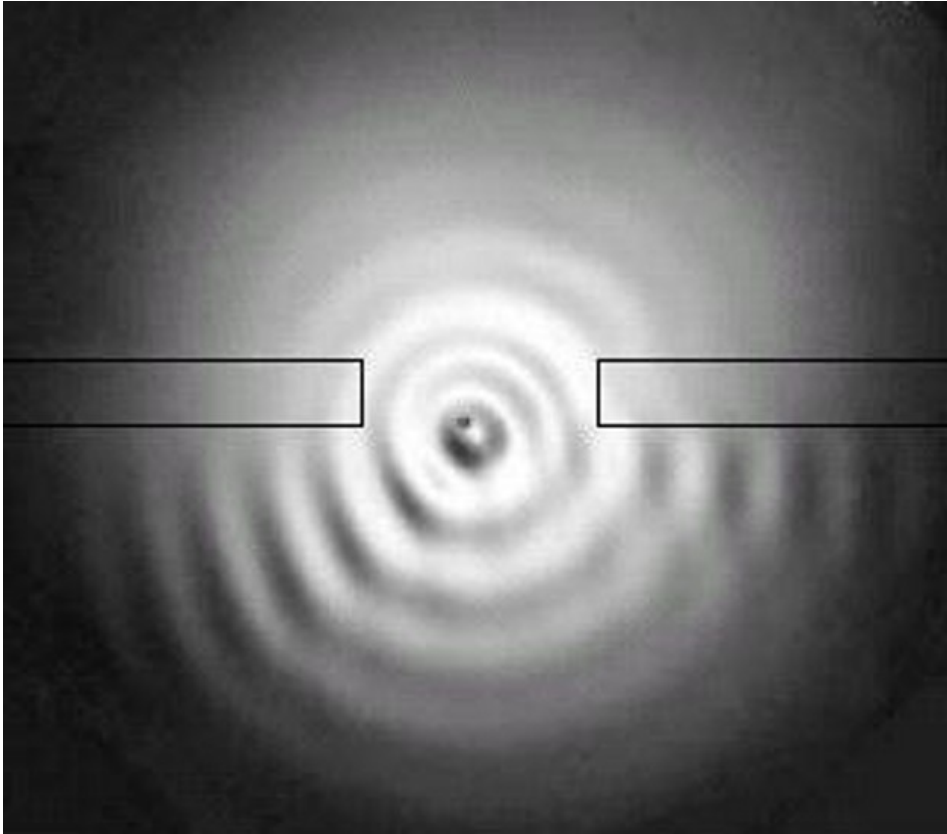
(Vidéo en Supplément de **Dynamical phenomena: Walking and orbiting droplets**, Y. Couder, S. Protière, E. Fort & A. Boudaoud, *Nature* 437, 208(8 September 2005); on notera la différence de moyens entre les télévisions américaines et les labos français)

Les choses vraiment amusantes et dérangeantes peuvent alors commencer : étant donné ce système dual onde-particule, déterministe et macroscopique, sa physique ressemble-t-elle à la physique quantique ?

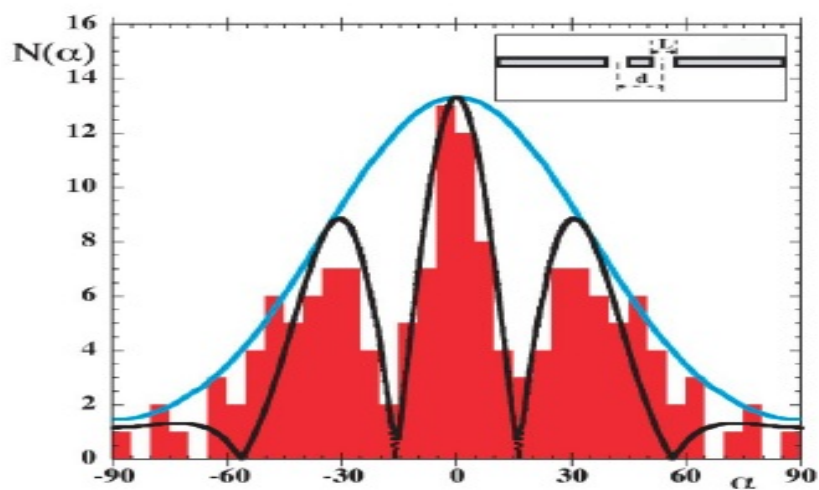
A ce jour, Couder et son équipe ont essayé plusieurs expériences, et de façon assez fascinante ont réussi à reproduire plusieurs effets quantiques. Toutes ces expériences reposent sur l'interaction du système goutte/onde avec l'équivalent macroscopique d'un mur, en l'occurrence ici une zone où on empêche la goutte de se propager par rebond (en modifiant la profondeur locale du bassin). Les effets suivants ont été observés : Couder et Fort ont reproduit avec leur système les figures de diffraction de la très fameuse expérience de fentes d'Young expliquée ci-dessous :

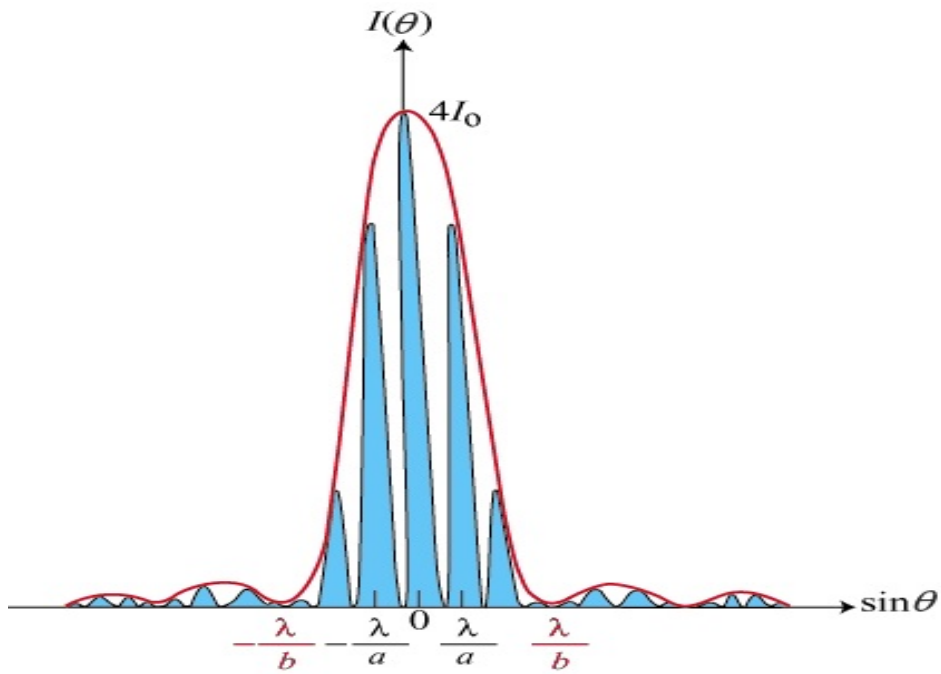
Feynman a dit un jour que cette expérience est un "*phénomène impossible, absolument impossible, à expliquer de façon classique et qui est au fondement même de la mécanique*"

quantique". On peut donc affirmer aujourd'hui que Feynman avait tort sur le premier point. L'expérience de Couder explique le paradoxe quantique suivant : on peut envoyer une seule goutte qui passe par une seule fente tout en ayant des interférences sur l'écran.



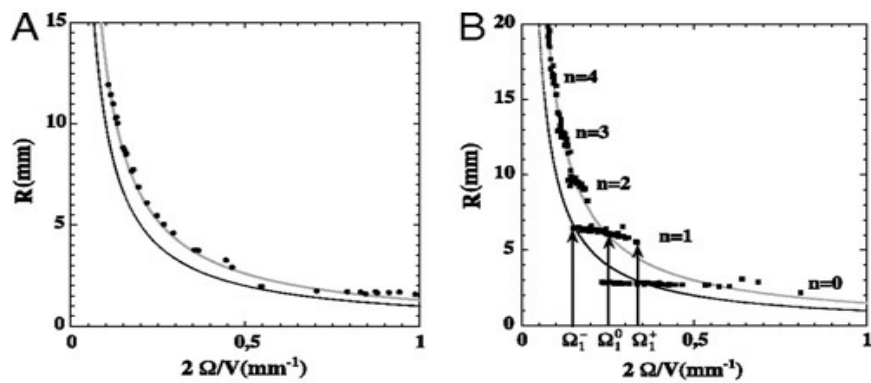
Comment ? L'idée est que l'onde porteuse qui guide la goutte rebondissante par une fente va interférer avec son homologue passant par l'autre fente, du coup, elle va guider et localiser *in fine* la goutte sur une seule bande d'interférence constructive de l'onde. Ce qui est très impressionnant est que cette expérience de Couder et Fort reproduit **exactement**, de façon tout à fait classique, l'expérience montrée par Dr Quantum ci-dessus : on envoie une à une des gouttes (comme Dr Quantum envoie des électrons) et la statistique des trajectoires individuelles des gouttes sur le long terme reproduit la figure de diffraction des ondes ! L'aspect probabiliste sur les trajectoires dans ce système classique vient quant à lui vraisemblablement d'une dynamique chaotique au moment où la goutte passe par la fente. Inutile d'invoquer un changement de nature de la goutte qui se dédouble en multivers quand elle passe les fentes !





Une goutte peut “traverser” un mur par l'équivalent macroscopique d'un **effet tunnel** - cet effet de mécanique quantique qui fait qu'une particule peut jouer les passe-murailles :

Last but not least, modulo une jolie analogie entre champ magnétique et vecteur rotation, une quantification est observable dans ce système : des “marcheurs” placés dans une bassine tournante sur elle-même ne peuvent aller n'importe où et se localisent précisément à certaines distances du centre, tout comme les niveaux d'énergie d'une particule quantique sont eux-mêmes discrets.



La plupart des effets “quantiques” reposent donc sur une interaction très forte entre la goutte et l’onde qui la guide. Comme l’explique **Yves Couder lui-même** :



Ce système où une particule est guidée par une onde se distingue des modèles théoriques d’ondes pilotes par le fait que tous les points récemment visités par le marcheur restent des sources d’ondes. La structure du champ d’onde forme donc une “mémoire” du chemin antérieur parcouru par la goutte.



Cette notion de mémoire de chemin est l’effet crucial, non local, nouveau par rapport à la théorie de De Broglie-Bohm, qui explique tous les comportements quantiques. Du coup, on peut se demander si ces expériences ne constituent pas les prémisses d’une révolution conceptuelle dans la mécanique quantique, car loin de simplement reproduire les résultats bien connus du monde quantique, elles suggèrent des nouvelles pistes de réflexions, des concepts, voire des expériences permettant de mieux appréhender l’infiniment petit.

Peut-être que le monde quantique sera *in fine* différent de cette image simple, mais les leçons épistémologique de cette série d’expériences n’en sont pas moins vertigineuses. D’abord, elles rappellent l’importance cruciale de la réalité expérimentale, trop souvent oubliée par les théoriciens. La nature sera toujours plus intelligente que nous. Ensuite, elles mettent en exergue le danger potentiel de trop se focaliser sur le formalisme, certes puissant, certes efficace, mais qui peut amener à occulter en partie la réalité même.

Extrapolons : imaginons que ces expériences aient quoi que ce soit à voir avec le monde quantique, on peut alors dire adieu au **principe d’incertitude d’Heisenberg** par exemple. Que penser alors de nombreuses “philosophies” développées autour de ce principe ? Enfin, il est fascinant de voir que cette physique des gouttes rebondissantes est un phénomène complexe, multi-échelle, avec mémoire, un phénomène typiquement émergent en somme. Se pourrait-il que la physique quantique, théorie phare du XXI^{ème} siècle, échoue en définitive à donner une vision simple de la réalité **par excès de réductionnisme** ?

Post-Scriptum : tout cela pose également des questions sur l’enseignement de la physique. J’avais déjà déploré dans **un billet précédent** l’accent mis sur la physique quantique au détriment de la physique classique des systèmes complexes, cette série d’expériences montre bien l’absurdité de la chose (et oui, moi **je veux la peau de Sheldon Cooper**).

Bêtisier : en rédigeant ce billet, je suis tombé sur **un communiqué du CNRS** de 2005 parlant de ces expériences. Pour le CNRS, donc :



Ce genre d’étude est relié aux applications industrielles qui font intervenir des gouttes, par exemple les imprimantes à jet d’encre.



On parle ici de révolution scientifique potentielle, de changement profond de notre connaissance du monde, et le CNRS parle imprimante à jet d'encre. C'est digne du petit jeu auquel on jouait **dans ce billet et en commentaires**.

Références

Couder Y, Protière S, Fort E, Boudaoud A. (2005) *Dynamical phenomena: Walking and orbiting droplets*. *Nature* 437:208.

Couder Y, Fort E (2006) *Single-particle diffraction and interference at a macroscopic scale*. *Phys Rev Lett* 97:154101-1–154101-4.

Eddi A, Fort E, Moisy F, Couder Y (2009) *Unpredictable tunneling of a classical wave-particle association*. *Phys Rev Lett* 102:240401-1–240401-4.

Bush JW (2010) *Quantum mechanics writ large* *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2010 107 (41) 17455-17456

Article initialement publié sur **Matières Vivantes** sous le nom "La nature de la réalité".

Photos Flickr CC par **zedamnabil**

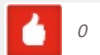
JACK3RROR

le 1 juin 2011 - 13:31 SIGNALER UN ABUS - PERMALINK



Dr quantum, c'est pas du tout un bon exemple à montrer, même si ce qu'ils disent dans ce paragraphe est vrai, l'ensemble de leur film est tourné pour faire croire que l'âme peut interférer la mécanique quantique. On est à un pas de la secte

VOUS AIMEZ



0

VOUS N'AIMEZ PAS



0

LUI RÉPONDRE

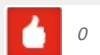
TOM ROUD

le 1 juin 2011 - 14:05 SIGNALER UN ABUS - PERMALINK



Justement, l'objet de ce billet est de souligner que ce genre d'interprétation est potentiellement vasouilleux. Mais ce passage est tout à fait conforme à l'interprétation de Copenhague et à ce qu'on enseigne en classe.

VOUS AIMEZ



0

VOUS N'AIMEZ PAS



0

LUI RÉPONDRE

TOM ROUD

le 2 juin 2011 - 19:05 SIGNALER UN ABUS - PERMALINK



A noter dans le Science du jour, une série d'expériences montrant que dans l'expérience des fentes d'Young décrite ci-dessus, le photon ne passe bien que par une fente !

<http://www.physorg.com/news/20...>

Les auteurs disent que leur expérience est plus compatible avec l'interprétation de Bohm-de Broglie !

VOUS AIMEZ



0

VOUS N'AIMEZ PAS



0

LUI RÉPONDRE

TROIS CASQUETTES


le 3 juin 2011 - 3:39 SIGNALER UN ABUS - PERMALINK



je suis tout à fait d'accord avec cet article. On croit tout savoir des comportements déterministes, mais il en existe qui se comportent très étrangement, de manière imprévisible, et qui semblent présenter des régularités imprévues (fractales de Mandelbrot), et même des irrégularités organisées (attracteurs, bestioles de Wolfram, bestioles du Jeu de la Vie), ou carrément de l'aléatoire de super qualité. L'univers du

déterminisme reste à explorer : c'est les phénomènes d'émergence et la non-linéarité. Les phénomènes quantiques seraient de cet ordre. Pas si différents dans le fond. Mais les physiciens n'aiment pas trop ces expérimentations qu'ils trouvent pas assez "physiquement" significatives, car elles sont informatiques et formelles. Mais dans le LargeHadronCollider, par exemple, on n'a affaire qu'à des statistiques comme résultats.

VOUS AIMEZ  0

VOUS N'AIMEZ PAS  0

LUI RÉPONDRE

MIFOS123

le 13 juin 2011 - 7:44 • SIGNALER UN ABUS - PERMALINK



Comme quoi, il faut toujours rester terre à terre!

VOUS AIMEZ  0

VOUS N'AIMEZ PAS  0

LUI RÉPONDRE

LOBLOB

le 1 novembre 2011 - 18:40 • SIGNALER UN ABUS - PERMALINK



Bonjour, je viens de lire "pour la science" de décembre, et cet article complète fort utilement le papier .


la démo de l'effet tunnel est très impressionnante !

la Physique Quantique m'a toujours désarçonné dans son interprétation de Copenhague,

Ici , le bon sens Einsteinien retrouve enfin des arguments convainquants !

Merci à ces magnifiques chercheurs , et aux vulgarisateurs talentueux!

VOUS AIMEZ  0

VOUS N'AIMEZ PAS  0

LUI RÉPONDRE