

Programme mini-colloque RNL 2016

« Dualité onde-corpuscule à l'échelle macroscopique »

Université Paris Diderot, 15 mars 2016

Amphithéâtre Buffon, 15 rue Hélène Brion, Paris 13e

Si la dualité onde-corpuscule est une des bases de l'interprétation de la mécanique quantique, elle peut aussi se manifester à l'échelle macroscopique. Durant ce mini-colloque seront présentées les propriétés observées dans des systèmes macroscopiques, ainsi que quelques-unes de leurs pendants aux échelles microscopiques. Un des objectifs est d'identifier les analogies et les différences entre ces deux types de systèmes.

9h15 : Yves Couder (MSC, Université Paris Diderot)

[L'étude d'une dualité onde-particule classique](#)

9h35 : Emmanuel Fort (Institut Langevin, ESPCI)

[Dualité classique : mémoire d'ondes et reflet du temps](#)

10h15 : Pause café

10h45 : Frédéric Chevy (LKB, Ecole Normale Supérieure)

[Hydrodynamique à l'échelle quantique](#)

11h25 : Paul Milewski (DMS, University of Bath, UK)

[Predictive fluid dynamics models of wave-droplet interactions](#)

12h05 : Pause déjeuner

14h00 : Benjamin Huard (LPA, Ecole Normale Supérieure)

[Introduction on non-classical effects in physics and new axioms for quantum theory](#)

14h40 : Matthieu Labousse (MPQ, Université Paris Diderot)

[Une double quantification non-quantique en potentiel harmonique ?](#)

15h10 : Tristan Gilet (Université de Liège, Belgique)

[Quantum-like statistics of deterministic wave-particle interactions in a circular cavity](#)

15h50 : Rémy Dubertrand (Université de Liège, Belgique)

[Gouttes marcheuses en présence d'obstacles](#)

16h10 : Pause Café

16h40 : Fabrice Lemoult (Institut Langevin, ESPCI)

[Métamatériaux localement résonants : polaritons et physique du solide à l'échelle macroscopique](#)

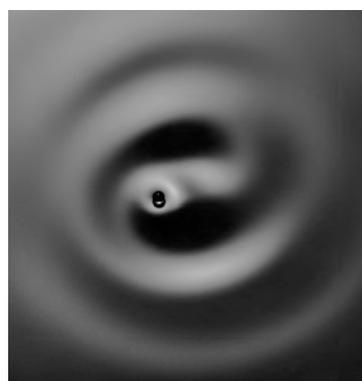
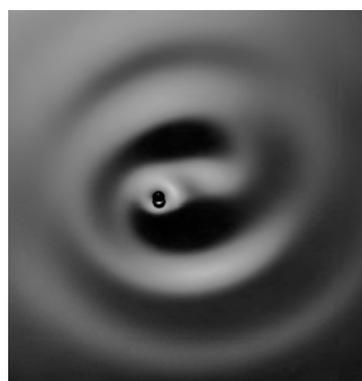
17h20 : Boris Filoux (Université de Liège, Belgique)

[Walking droplets in confined geometry](#)

17h40 : Cristiano Ciuti (MPQ, Université Paris Diderot)

[Fluides quantiques de lumière](#)

18h20 : Clôture



L'étude d'une dualité onde-particule classique

Yves Couder

Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, Université Paris Diderot, Paris, France
couder@lps.ens.fr

C'est en 2004 qu'on a trouvé que des gouttes rebondissant sur un liquide vibrant peuvent devenir auto-propulsées en se couplant aux ondes qu'elles génèrent. La structure résultante, formée par la goutte et son onde associée est une entité symbiotique et l'observation expérimentale de certains de phénomènes de dualité onde-particule explique l'intérêt qui s'est progressivement porté vers ce système.

Onze ans plus tard on peut voir que des angles d'attaque très divers ont été suivis. On peut regrouper d'abord toutes les études qui ont permis de caractériser ce système en tant que tel. Elles ont concerné l'hydrodynamique des rebonds, les relations entre ondes progressives (avancées et retardées) et ondes stationnaires, les effets non locaux résultant : écho-location spatiale et mémoire temporelle.

Par ailleurs d'autres travaux ont cherché à caractériser les phénomènes de dualité : mise en évidence d'états propres pour des trajectoires confinées, apparition de propriétés statistiques issues de phénomènes chaotiques, effets de réduction du paquet d'ondes.

Cette journée devrait permettre de mettre en évidence les convergences entre ces approches et d'aborder la question de l'éventuelle généralité des comportements de dualité onde-particule.

Dualité classique : mémoire d'ondes et reflet du temps

Emmanuel Fort

Institut Langevin, ESPCI Paris, 1 rue Jussieu, 75238 PARIS Cedex 05, France.
emmanuel.fort@espci.fr

Some three centuries ago, Newton suggested that corpuscles of light generate waves in an aethereal medium like a skipping stone generates waves in water, their motion then being affected by these waves. Today, light corpuscles are known as photons, and the notion of aether has been abandoned. Nevertheless, in certain features of Newton's metaphor live on in some theories in which particles are guided by their own wave.

I will discuss the behavior of a macroscopic object composed of a material particle dynamically coupled to a wave packet. The particle is a droplet bouncing on the surface of a vertically vibrated liquid bath, its pilot-wave is made of the superposition of the surface waves it excites. Above an excitation threshold, this symbiotic object, designated as a *walker* becomes self-propelled. Such a walker exhibits several features previously thought to be specific to the microscopic realm. The unexpected appearance of both uncertainty and quantization behaviors at the macroscopic scale originates in the essence of this "classical" duality. I will present experiments that are the analog of quantum experiments (diffraction and Young's double slit experiment, orbital quantization, tunneling,...

The dynamics of the droplet depends on previously visited spots along its trajectory through the surface waves emitted during each bounce. This path memory dynamics gives a walker an intrinsic spatio-temporal non-locality. I will discuss the characteristics of these objects that encode a wave memory. In particular, I will introduce the concept of temporal mirrors to interpret the backward propagating waves.

Hydrodynamique à l'échelle quantique

Frédéric Chevy

Laboratoire Kastler Brossel, École normale supérieure, Paris, France
chevy@lkb.ens.fr

Bien que régie par la mécanique quantique, la dynamique des superfluides présente de fortes similitudes avec celle des fluides classiques. Dans mon exposé, je montrerai comment les concepts hérités de la physique classique permettent de comprendre la physique des gaz quantiques. Depuis les solitons d'onde de matières jusqu'aux tourbillons quantiques, les gaz d'atomes ultra-froids fournissent ainsi de remarquables illustrations des grands paradigmes de la physique non-linéaire.

Predictive fluid dynamics models of wave–droplet interactions

Paul A. Milewski

Department of Mathematical Sciences, University of Bath, Bath BA2 7AY UK
p.a.milewski@bath.ac.uk

I will describe recent work that is yielding new fluid dynamics based models for the wave–droplet problem which are both accurate and efficient to compute. Recent work has resulted in models which allow us to predict the details and stability of various complex states including promenades, orbiting drops, trajectories under force fields, *etc.*

Introduction on non-classical effects in physics and new axioms for quantum theory

Benjamin Huard

Laboratoire Paul Aigrain, École normale supérieure, Paris, France
benjamin.huard@ens.fr

Une double quantification non-quantique en potentiel harmonique ?

Matthieu Labousse

Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université Paris Diderot, Paris, France
matthieu.labousse@univ-paris-diderot.fr

À l'échelle macroscopique, les ondes et les particules sont des objets distincts. La découverte d'objets appelés *marcheurs*, constitués d'une goutte rebondissant sur un bain liquide vibré verticalement, a montré qu'il n'en était rien. La goutte est autopropulsée, guidée sur la surface du liquide par l'onde qu'elle

a elle-même créée lors des rebonds précédents. Ces objets possèdent une dynamique originale dominée par le concept de *mémoire de chemin*. La structure du champ d'onde qui guide la goutte dépend, en effet, de la position des rebonds passés disposés le long de la trajectoire. La profondeur de cette mémoire peut, de plus, être contrôlée expérimentalement en changeant l'accélération du bain. De nombreuses réalisations expérimentales ont mis en évidence les comportements dynamiques singuliers de ces systèmes couplés goutte/onde. Nous avons étudié l'évolution d'un marcheur numérique en potentiel harmonique bidimensionnel. Un ensemble relativement restreint de trajectoires stables est obtenu. Nous verrons en quoi l'expression du caractère non-local d'un marcheur permet d'en révéler les symétries internes et d'assurer la convergence du système dynamique vers un jeu d'états propres de basse dimension et doublement quantifiés.

Quantum-like statistics of deterministic wave–particle interactions in a circular cavity

Tristan Gilet

Microfluidics Lab, Dept. Aerospace & Mech. Eng., University of Liege, Belgium
tristan.gilet@ulg.ac.be

A deterministic low-dimensional iterated map is here proposed to describe the interaction between a bouncing droplet and Faraday waves confined to a circular cavity. Its solutions are investigated theoretically and numerically. The horizontal trajectory of the droplet can be chaotic: it then corresponds to a random walk of average step size equal to half the Faraday wavelength. An analogy is made between the diffusion coefficient of this random walk and the action per unit mass of a quantum particle. The statistics of droplet position and speed are shaped by the cavity eigenmodes, in remarkable agreement with the solution of Schrödinger equation for a quantum particle in a similar potential well.

Gouttes marcheuses en présence d'obstacles

Rémy Dubertrand, Maxime Hubert, Peter Schlagheck, Nicolas Vandewalle, Thierry Bastin & John Martin

Département de Physique, Université de Liège, 4000 Liège, Belgique
remy.dubertrand@ulg.ac.be

Nous sommes intéressés à une goutte rebondissante sur un bain vibrant. À cause de l'instabilité de Faraday, une onde de surface est créée à chaque impact et constitue une *onde pilote* pour la goutte. Ces deux éléments forment une goutte marcheuse, aussi appelée « marcheur ». Depuis l'expérience du groupe d'Y. Couder [1] il y a eu un effort particulier pour reproduire les résultats expérimentaux. Le résultat le plus surprenant est probablement le motif de diffraction et d'interférence pour les trajectoires de marcheurs en champ lointain après passage sur une simple ou double fente. Ceci pose la question si ce système macroscopique peut reconstituer la dualité onde/corpuscule propre à une particule quantique. Ce système est d'autant plus stimulant qu'il a été étudié par plusieurs groupes dans des géométries différentes [2–5].

Dans l'étude [6] nous proposons un modèle très polyvalent inspiré d'une approche de mécanique quantique pour étudier la forme de ces trajectoires. Ce modèle propose une alliance de perspectives entre un point de vue « mécanique des fluides » et un point de vue « dynamique quantique complexe ». Plus précisément il utilise un formalisme de fonction de Green et permet de traiter la dynamique d'un marcheur en géométrie arbitraire. Il permet surtout de reproduire de manière qualitative le profil de diffraction pour les trajectoires d'un marcheur derrière une simple fente.

Références

1. Y. COUDER, AND E. FORT, Single-Particle Diffraction and Interference at a Macroscopic Scale, *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 154101 (2006).
2. D. M. HARRIS, J. MOUKHTAR, E. FORT, Y. COUDER, J. W. M. BUSH, Wavelike statistics from pilot-wave dynamics in a circular corral, *Phys. Rev. E*, **88**, 011001(R) (2013).
3. D. SHIROKOFF, Bouncing droplets on a billiard table, *Chaos*, **23**, 013115 (2013).
4. T. GILET, Dynamics and statistics of wave-particle interactions in a confined geometry, *Phys. Rev. E*, **90**, 052917 (2014).
5. B. FILOUX, M. HUBERT, N. VANDEWALLE, Strings of droplets propelled by coherent waves, *Phys. Rev. E*, **92** 041004(R) (2015).
6. R. DUBERTRAND, M. HUBERT, P. SCHLAGHECK, N. VANDEWALLE, T. BASTIN, J. MARTIN, Walking droplets in presence of obstacles, to be submitted to *New J. Phys.* (2016).

Métamatériaux localement résonants : polaritons et physique du solide à l'échelle macroscopique

Fabrice Lemoult, Nadège Kaina, Mathias Fink & Geoffroy Lerosey

Institut Langevin, ESPCI Paris and CNRS UMR 7587

`fabrice.lemoult@espci.fr`

En acoustique audible ou bien en électromagnétisme micro-ondes, les longueurs d'onde peuvent atteindre des distances métriques et il devient aisé d'étudier la propagation des ondes sur des dimensions sub-longueur d'ondes. C'est dans cette optique que nos recherches se sont concentrées sur l'étude de la propagation dans des milieux composés de résonateurs sub-longueur d'onde interagissant avec le continuum des ondes. Ainsi, nous mettons en évidence que la canette de soda, un résonateur d'Helmholtz en acoustique, et un fil métallique de longueur finie en électromagnétisme, sont des analogues d'un atome à deux niveaux vis-à-vis des ondes optiques. Le couplage entre une onde et ces résonateurs spatialement localisés donne naissance à un état hybride, bien connu en physique du solide sous le nom de polariton. Il s'agit d'une quasi-particule résultant du couplage entre un photon et un exciton. Aux échelles macroscopiques, il est difficile de concevoir une telle quasi-particule mais nous mettons en évidence que la propagation dans des milieux composés de tels résonateurs est régie par la même physique. Notamment, le couplage entre une onde incidente et ces atomes macroscopiques donne naissance à des bandes propagatives d'indice élevé ou à des bandes interdites, résultantes toutes deux d'interférences de Fano entre les continuum des ondes et l'onde diffusée par le résonateur. Chaque gamme spectrale de cette relation de dispersion présente son intérêt que nous illustrons expérimentalement. Nous montrons ainsi des résultats de focalisation en-dessous de la limite de diffraction en exploitant les interférences cohérentes entre l'onde incidente et les ondes réémises [1]. Puis, nous exploitons les interférences destructives pour montrer la possibilité de guider les ondes sur des échelles indépendantes de la longueur d'onde [2]. Enfin, nous abordons les nombreuses possibilités que ces dispositifs expérimentaux offrent afin d'étudier la physique du solide à l'échelle macroscopique, par exemple avec l'obtention d'un milieu à indice négatif [3].

Références

1. F. LEMOULT, G. LEROSEY & M. FINK, Acoustic resonators for far-field Control of sound on a subwavelength scale, *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 064301 (2011).
2. F. LEMOULT, N. KAINA, M. FINK & G. LEROSEY, Wave propagation control at the deep subwavelength scale in metamaterials, *Nature Phys.*, **9**, 55–60 (2013).
3. N. KAINA, F. LEMOULT, M. FINK & G. LEROSEY, Negative refractive index and acoustic superlens from multiple scattering in single negative metamaterials, *Nature*, **525**, 77–81 (2015).

Walking droplets in confined geometries

Boris Filoux, Maxime Hubert & Nicolas Vandewalle

GRASP, Institute of Physics, B5a, University of Liège, B-4000 Liège, Belgique

boris.filoux@ulg.ac.be

Lorsqu'on dépose délicatement une goutte sur un bain vibré verticalement, sous certaines conditions, nous parvenons à éviter le phénomène de coalescence. La goutte rebondit alors de façon permanente. En augmentant l'accélération de forçage, la goutte atteint un régime dynamique lui permettant de se déplacer horizontalement à la surface du liquide, à vitesse constante [1,2]. En se mouvant ainsi, la goutte marcheuse laisse dans son sillage des sources d'ondes stationnaires résultant de ses impacts sur la surface. Ce sont ces ondes qui sont à l'origine de la marche. Ces dernières années ont vu l'apparition de techniques de confinement de gouttes dans une géométrie bidimensionnelle : cavité cylindrique, potentiel harmonique ou encore force de Coriolis [3,4]. D'autre part, les interactions entre deux marcheurs identiques ont également été caractérisées [5].

Au cours de notre exposé, nous montrons qu'il est possible de confiner un marcheur dans une géométrie quasi 1d en utilisant des cavités submergées. En premier lieu, nous présentons des expériences menées dans des cavités rectangulaires, de largeurs proportionnelles à la longueur d'onde de Faraday. L'étude des vitesses transversales et longitudinales des marcheurs au sein de ces cavités, nous permet de trouver un critère pour obtenir un confinement à 1d optimal. En s'intéressant aux ondes de Faraday émises dans la cavité, nous proposons ensuite une analogie avec les guides d'ondes pour rendre compte de l'évolution de la vitesse des marcheurs dans les cavités. Dans une seconde partie, nous utilisons des cavités annulaires afin d'étudier les interactions inter-gouttes et montrons qu'une quantification des interdistances apparaît. Nous étudions la vitesse de binômes de gouttes, l'interdistance entre les gouttes influe sur leur vitesse de groupe : ces gouttes se déplacent plus vite lorsqu'elles sont proches. Nous portons enfin notre intérêt sur les chaînes de gouttes. Ces dernières partagent la même onde cohérente qui tend à autopropulser le système à une vitesse supérieure à celle d'une goutte seule. Nous discutons de l'influence du nombre de gouttes, mais également de la distance entre ces dernières sur la vitesse d'une chaîne. L'évolution de la vitesse d'une chaîne est le résultat d'interférences constructives entre chaque onde émise par chaque goutte. Nous proposons enfin un modèle rendant compte de la quantification des distances et de l'évolution des vitesses selon les différents paramètres [6].

Références

1. Y. COUDER, S. PROTIÈRE, E. FORT & A. BOUDAUD, *Nature*, **437**, 208 (2005).
2. S. PROTIÈRE, A. BOUDAUD & Y. COUDER, *J. Fluid Mech.*, **554**, 85–108 (2006).
3. S. PERRARD, M. LABOUSSE, M. MISKIN, E. FORT & Y. COUDER, *Nat. Comm.*, **5**, 3219 (2014).
4. M. LABOUSSE & S. PERRARD, *Phys. Rev. E*, **90**, 022913 (2014).
5. C. BORGHESI, J. MOUKHTAR, M. LABOUSSE, A. EDDI, E. FORT & Y. COUDER, *Phys. Rev. E* **90**, 063017 (2014).
6. B. FILOUX, M. HUBERT & N. VANDEWALLE, *Phys. Rev. E* **92**, 041004(R) (2015).

Fluides quantiques de lumière

Cristiano Ciuti

Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, Université Paris Diderot, Paris, France

cristiano.ciuti@univ-paris-diderot.fr