

Localiser les atomes dans le désordre : une affaire française

Nicolas Cherroret (nicolas.cherroret@lkb.upmc.fr)

Laboratoire Kastler Brossel (LKB, UMR 8552 CNRS, Sorbonne Université, ENS-PSL Research University, Collège de France),
4 Place Jussieu, 75005 Paris

Lorsqu'une particule quantique se propage dans un environnement désordonné, son comportement devient contre-intuitif : au lieu de diffuser sur de longues distances comme le ferait une particule classique, elle reste piégée dans une région finie de l'espace. Ce phénomène, appelé localisation d'Anderson, résulte d'interférences quantiques subtiles et universelles et continue de fasciner les physiciens. En juin 2025, une conférence scientifique s'est tenue à Paris afin de faire le point sur les avancées récentes dans ce domaine, notamment dans le contexte des atomes froids. Cet évènement a également rendu hommage à Dominique Delande, chercheur du CNRS disparu récemment et figure majeure de la physique des systèmes quantiques complexes. Il a réuni de nombreux spécialistes, témoignant du dynamisme national autour de ce sujet fondamental. Retour sur un champ de recherche où les laboratoires français brillent, à la croisée de la théorie et de l'expérience.

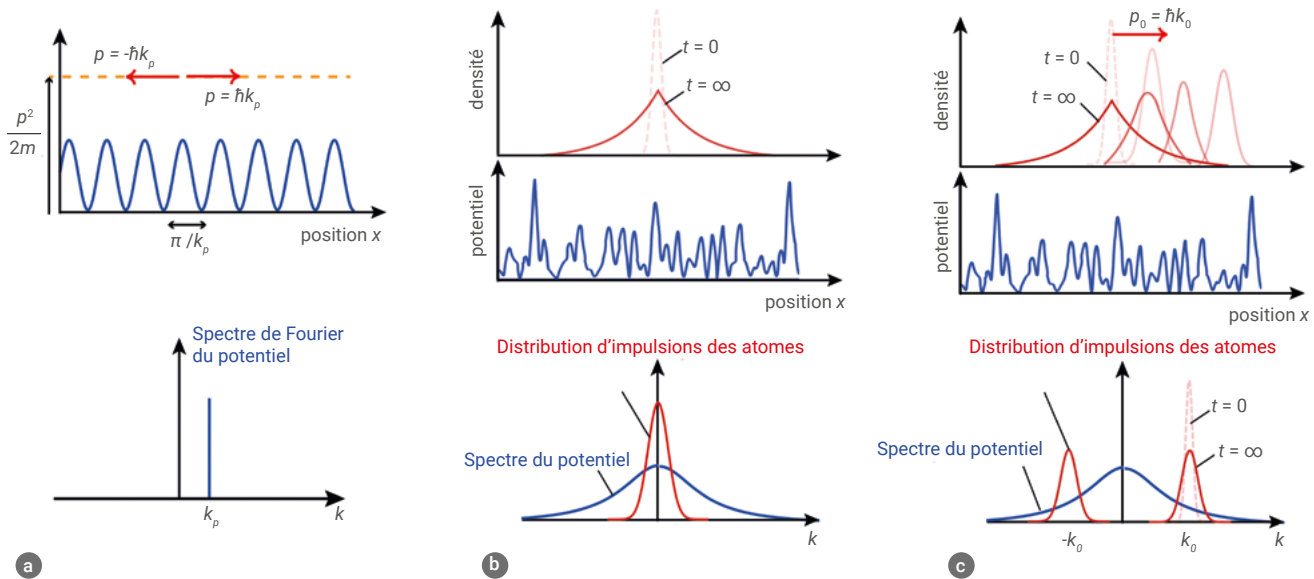
Les 16 et 17 juin 2025, une conférence scientifique organisée au cœur de Paris, à Sorbonne Université, a réuni plus d'une centaine de physiciens venus échanger autour de la physique des systèmes quantiques complexes. L'évènement a été l'occasion de rendre hommage à Dominique Delande, chercheur du CNRS au Laboratoire Kastler Brossel (LKB), qui a consacré sa carrière à l'étude de ces systèmes, en particulier dans le contexte de la physique atomique. Le programme a accordé une place importante à la physique de la localisation d'Anderson, du nom du chercheur américain lauréat du prix Nobel de physique en 1977. Depuis les premières observations indirectes de ce phénomène pour les électrons dans les métaux et semi-conducteurs, les deux dernières décennies ont vu fleurir de nombreuses avancées théoriques et expérimentales impliquant des atomes ultrafroids (voir encadré) – un domaine où les laboratoires français ont joué un rôle pionnier.

Tout commence avec un problème de conduction

L'histoire de la localisation d'Anderson trouve son origine dans la physique de l'état solide, à travers l'étude de la conduction

électrique assurée par les électrons des couches externes des atomes. Au début du XX^e siècle, le modèle de Drude décrit la résistance des métaux comme une friction des électrons due à leurs collisions avec les atomes du réseau cristallin. Cette image classique sera corrigée avec l'avènement de la mécanique quantique, qui montre que les électrons dans un cristal parfait possèdent des fonctions d'onde spatialement étendues (théorème de Bloch), conduisant à une conduction parfaite. En réalité, la résistance électrique dans un métal ou un semi-conducteur provient de la diffusion des électrons sur les défauts du cristal, c'est-à-dire la composante non régulière, ou *désordonnée* du matériau. Jusque dans les années 60, la théorie de Drude semblait néanmoins suffisante, prédisant qu'un désordre croissant réduit simplement la conductivité, sans remettre en cause le transport dans les métaux. Tout change en 1958, lorsque Philip Anderson démontre qu'au-delà d'un certain seuil de désordre, les fonctions d'onde des électrons se localisent spatialement, entraînant un blocage total du transport et une transition vers un état isolant [2]. Ce résultat, en rupture avec les modèles de Drude et de Bloch, met en lumière le rôle central du désordre dans le transport quantique. Sa portée sera

confirmée une quinzaine d'années plus tard par la théorie d'échelle de la localisation, inspirée notamment de travaux de David Thouless dans les années 1970. Cette approche définit le concept de localisation par la sensibilité des fonctions d'onde des électrons aux conditions de bord imposées au système, et conduit à une prédiction majeure et révolutionnaire à l'époque : dans un milieu même très faiblement désordonné, la localisation des fonctions d'onde est *inévitabile* en une et deux dimensions, tandis qu'en trois dimensions elle se manifeste sous la forme d'une transition de phase quantique entre un métal et un isolant à une certaine valeur critique de désordre. Dans les années 80, plusieurs expériences ont mis en évidence, par des mesures de conductivité électrique, des signatures de la suppression du transport électronique prédite par Anderson dans des métaux et semi-conducteurs. Dans ces matériaux, cette suppression n'est toutefois jamais parfaite en raison des vibrations du réseau cristallin, qui tendent à rétablir un transport *via* le couplage entre électrons et phonons. Par ailleurs, dans les expériences de matière condensée de l'époque, il était impossible de visualiser directement la localisation spatiale des fonctions d'onde électroniques.



1. Principe de la localisation d'Anderson à une dimension

(a) En présence d'un potentiel périodique de périodicité spatiale π/k_p , une particule quantique subit une réflexion de Bragg si son impulsion est exactement $p = \hbar k_p$ et ce, même si son énergie excède le maximum du potentiel.

(b) Contrairement à un potentiel périodique, un potentiel désordonné comporte de nombreuses composantes de Fourier k . Chaque composante d'impulsion $p = \hbar k$ d'un paquet d'onde trouve donc nécessairement une composante du potentiel à $2k$ sur laquelle elle est réfléchi. L'effet net est une localisation spatiale du profil de densité du paquet aux temps longs.

(c) Cas d'un paquet d'ondes initialement « poussé » avec une impulsion moyenne $p_0 = \hbar k_0$. Le paquet se déplace d'abord latéralement, avant de faire demi-tour et de finalement se localiser à sa position de départ : c'est l'effet de « boomerang quantique ». Il est lié à des interférences entre les composantes $-k_0$ et $+k_0$ de la distribution d'impulsions des atomes.

Une histoire d'ondes

On sait aujourd'hui que la localisation d'Anderson est avant tout un phénomène ondulatoire [3]. En mécanique quantique, toute particule massive (électron ou atome) est associée à une longueur d'onde de de Broglie, susceptible de produire des interférences à basse température. Dans un matériau, les ondes électroniques partielles, diffusées sur les irrégularités du potentiel représentant les défauts du cristal, peuvent interférer de manière destructive, ce qui conduit à une suppression du transport. Les figures 1a et 1b illustrent ce phénomène en une dimension : dans un potentiel périodique de périodicité π/k_p , une particule d'impulsion *exactement* $p = \hbar k_p$ subit une réflexion quantique selon la loi de Bragg (figure 1a). Cette réflexion empêche sa propagation à grande distance, même si son énergie $p^2/2m$ dépasse le maximum du potentiel – contrairement à une particule classique. Dans le cas d'un potentiel désordonné (figure 1b), dont le spectre de Fourier est étendu, une particule d'impulsion *quelconque* $p = \hbar k$ rencontre toujours une composante de Fourier à $2k$ sur laquelle elle est réfléchi.

Ainsi, pour un paquet d'onde contenant une gamme d'impulsions p , chaque composante de la gamme est réfléchi, ce qui conduit à la localisation spatiale du paquet aux temps longs. C'est le principe de la localisation d'Anderson à une dimension.

La localisation d'atomes froids et des nouvelles découvertes

Depuis le début des années 2000, les plateformes d'atomes froids ont permis d'explorer avec une précision inédite la physique de la localisation d'Anderson [4]. Ces expériences ont occupé une place centrale lors de la conférence de juin 2025 à Paris, et beaucoup ont été menées dans des laboratoires français, notamment au LCFIO à Palaiseau, au laboratoire PhLAM à Lille, ou encore au LCAR à Toulouse. La première observation directe de la localisation d'Anderson avec des atomes froids a été réalisée en 2008 au LCFIO [5], dans l'équipe de Vincent Josse et Alain Aspect. En générant un désordre optique de type *speckle* à partir d'un laser transmis à travers une surface rugueuse (fig. 2a), les

chercheurs ont suivi l'étalement, puis la localisation spatiale d'un nuage d'atomes ultrafroids guidé par un faisceau lumineux (figure 2b), reproduisant le scénario de la figure 1b.

La conférence parisienne a également mis en lumière des manifestations plus subtiles, mais spectaculaires, de la localisation d'atomes ultrafroids dans des *speckles* optiques. Arrêtons-nous sur l'une d'entre elles, reposant sur un scénario différent de celui du LCFIO : au lieu de sonder l'étalement symétrique d'un paquet d'onde, imaginons qu'on lui imprime initialement une impulsion moyenne p_0 , comme si l'on projetait une « balle quantique ». Dans ce cas, la distribution d'impulsions des atomes acquiert une forme piquée autour de p_0 , comme cela est illustré sur la figure 1c. Après son lancement, le paquet d'onde est diffusé élastiquement par le désordre, générant des composantes d'impulsions autour de $-p_0$. On peut alors montrer que l'interférence quantique entre les composantes p_0 et $-p_0$ provoque un demi-tour du paquet puis son retour vers son point de départ aux temps longs, à l'image d'un boomerang. Ce phénomène de « boomerang quantique », prédit

>>>

>>>

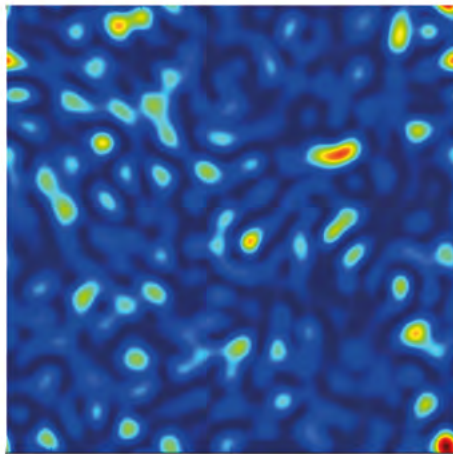
en 2019 par l'équipe de Dominique Delande au LKB [6], a ensuite été caractérisé dans différents types de systèmes désordonnés. Ces travaux théoriques ont conduit à la première observation expérimentale d'un boomerang quantique d'atomes froids à l'université de Californie en 2022 [7] (figure 2c). En parallèle, les chercheurs se sont également intéressés à la dynamique de la distribution d'impulsions elle-même, composée de deux lobes après le lancement du paquet (figure 1c). Sous l'effet de la localisation d'Anderson, chacun de ces lobes présente des signatures interférentielles

appelées pics de diffusion cohérente vers l'avant et vers l'arrière. Théorisés à partir de 2012 par l'équipe de Christian Miniatura au CQT à Singapour en collaboration avec le groupe du LKB [8], ces interférences dans l'espace des impulsions ont été observées indirectement par l'équipe de Jean-Claude Garreau et Pascal Szriftgiser au laboratoire PhLAM en 2019. Plus récemment, en 2025, le groupe de David Guéry-Odelin du LCAR de Toulouse en a fourni une observation directe, grâce à des outils avancés de contrôle optimal et de tomographie d'états quantiques [9] (figure 2d).

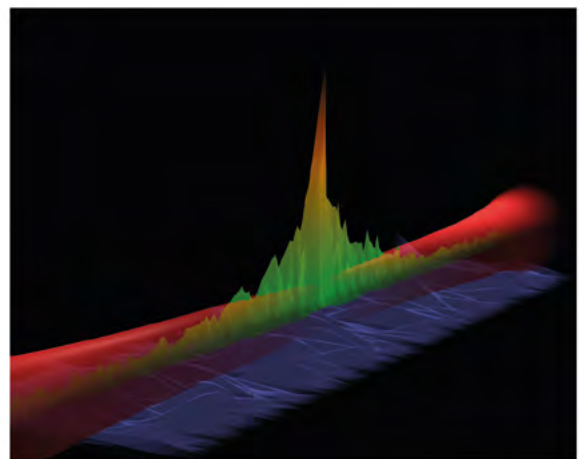
De nouvelles expériences et des problèmes ouverts

Près de 60 ans après la découverte d'Anderson, les expériences sur les atomes froids permettent désormais d'explorer les aspects les plus subtils du phénomène de localisation. L'un des plus marquants est la transition de phase métal-isolant, qui se produit généralement dans les milieux désordonnés en trois dimensions. Des travaux pionniers menés dès 2009 au laboratoire PhLAM à Lille, en collaboration avec Dominique Delande, ont permis d'en obtenir

Désordre optique de type *speckle*

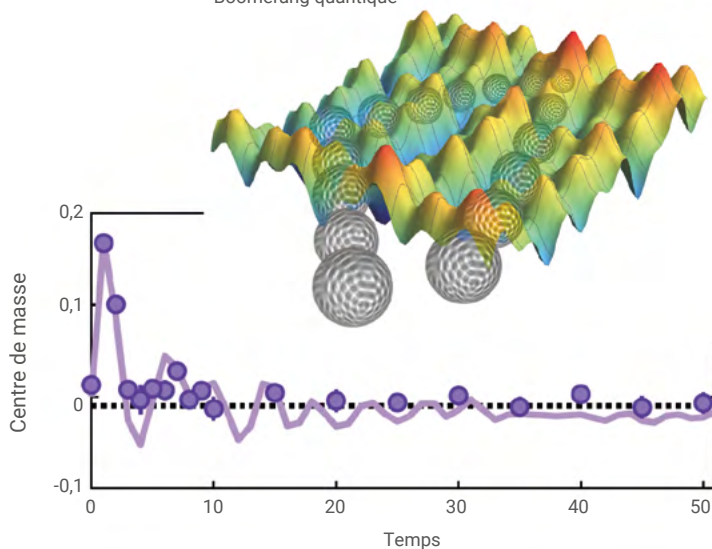


Localisation d'Anderson de paquet d'ondes

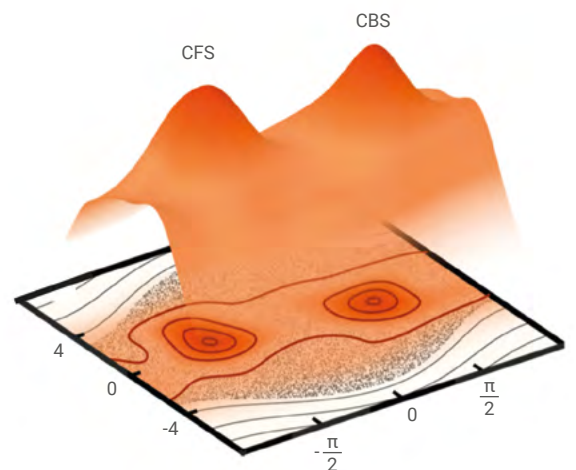


a b
c d

Boomerang quantique



Diffusion cohérente vers l'avant (CFS) et l'arrière (CBS)



2. La localisation d'Anderson sondée par des expériences d'atomes froids

- (a) Désordre optique de type *speckle*, produit par un laser transmis à travers une surface rugueuse
- (b) Localisation d'Anderson d'un paquet d'ondes atomique dans un guide optique désordonné [5].
- (c) Illustration d'artiste du phénomène de boomerang quantique d'une particule dans un paysage désordonné, et mesure expérimentale de l'effet boomerang sur le centre de masse d'un paquet d'onde en une dimension [6,7].
- (d) Reconstruction expérimentale des pics de diffusion cohérente vers l'avant et l'arrière dans un gaz quantique [9].

LES ATOMES ULTRAFROIDS COMME SIMULATEUR QUANTIQUE DE LA PHYSIQUE DU DÉSORDRE

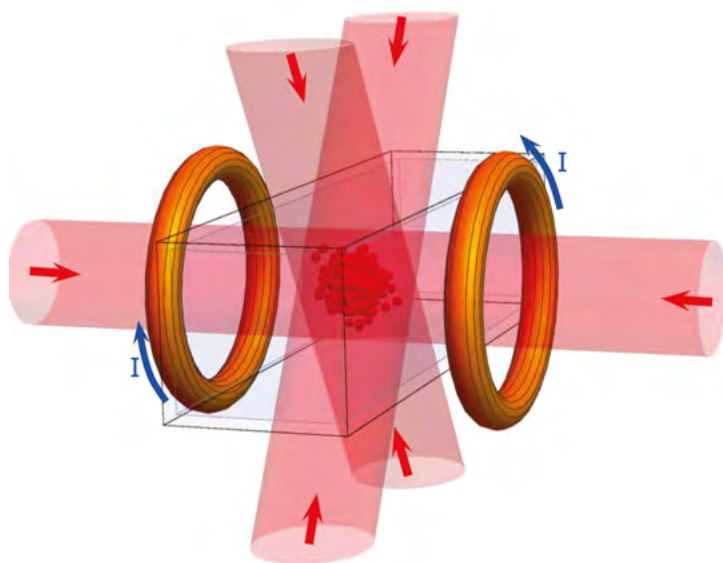


Schéma d'un piège magnéto-optique permettant le refroidissement et le piégeage d'atomes (figure adaptée de [1])

Depuis les années 2000, les gaz d'atomes ultrafroids se sont imposés comme de remarquables « simulateurs quantiques », capables de reproduire dans des conditions idéales des phénomènes physiques difficiles à isoler dans la nature. Ils sont obtenus en refroidissant des atomes à l'aide de lasers qui les ralentissent par pression de radiation. En utilisant de tels faisceaux combinés à un champ magnétique (figure ci-contre), on parvient à piéger les atomes dans une petite région à des températures de quelques dizaines de microkelvins. Un refroidissement évaporatif supplémentaire, consistant à expulser les atomes les plus chauds du nuage, permet ensuite d'atteindre la limite de dégénérescence quantique. Dans ce régime, la longueur d'onde de de Broglie des atomes devient comparable à la distance interatomique : ils se comportent alors comme des ondes de matière d'une très grande cohérence, capables de produire des interférences. Une fois le gaz refroidi, son évolution peut être étudiée dans divers potentiels également façonnés par des lasers, de forme spatiale adaptée à la physique que l'on souhaite explorer. En modulant aléatoirement les faisceaux dans l'espace, il est en particulier possible de réaliser des potentiels désordonnés, comme le *speckle* optique illustré sur la figure 3a, afin d'étudier de façon très contrôlée la physique de la localisation d'Anderson.

une réalisation et une caractérisation précises dans un système chaotique d'atomes froids reproduisant la physique du désordre. Quelques années plus tard, en 2012 et 2015, des expériences réalisées au LCFIO à Palaiseau et au LENS à Florence ont mis en évidence cette transition dans un désordre spatial optique, sans toutefois parvenir à caractériser précisément le point critique. Aujourd'hui encore, l'étude expérimentale détaillée des propriétés critiques de cette transition à l'aide d'atomes évoluant dans des potentiels lumineux désordonnés demeure un défi passionnant. Au-delà du problème d'Anderson, enfin, les gaz quantiques d'atomes froids constituent également une plateforme privilégiée pour étudier le rôle du désordre dans des régimes où les interactions entre atomes deviennent significatives. À très basse température, ces interactions favorisent la superfluidité, un état de la matière où le transport s'effectue sans friction — à première vue, l'exact opposé de la localisation. La frontière entre superfluidité et isolant d'Anderson reste encore

peu explorée sur le plan expérimental. Les prochaines années devraient apporter de nouvelles avancées dans ce domaine, afin

de mieux comprendre comment désordre et interactions façonnent la dynamique du monde quantique. ■



- 1• R. Kaiser, M. Leduc et H. Perrin, *Atomes, ions, molécules ultrafroids. Applications aux technologies quantiques*, EDP Sciences (2020).
- 2• P.W. Anderson, "Absence of diffusion in certain random lattices", *Phys. Rev.* **109** (1958) 1492.
- 3• D. Delande *et al.*, « La localisation forte d'Anderson », *Images de la physique* (2009) 70-74.
- 4• A. Aspect et M. Inguscio, "Anderson localization of ultracold atoms", *Physics Today* **62** (2009) 30.
- 5• J. Billy *et al.*, "Direct observation of Anderson localization of matter waves in a controlled disorder", *Nature* **453** (2008) 891.
- 6• T. Prat, D. Delande et N. Cherroret, "Quantum boomerang-like effect of wave packets in random media", *Phys. Rev. A.* **99** (2019) 023629.
- 7• R. Sajjad *et al.*, "Observation of the quantum boomerang effect", *Phys. Rev. X* **12** (2022) 011035.
- 8• T. Karpiuk *et al.*, "Coherent forward scattering peak induced by Anderson localization", *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 190601.
- 9• F. Arrouas *et al.*, "The Coherent Forward Scattering peak: a probe of non-ergodicity and symmetries in a quantum chaotic system", *preprint arXiv:2503.01777* (2025).