

## **Turbulence superfluide et tourbillons quantiques sur une surface courbe**

Les gaz quantiques constituent un système de choix pour réaliser des simulateurs quantiques analogiques : leur grand degré de contrôle et l'accès direct à des images de la densité du gaz permettent de simuler efficacement d'autres systèmes quantiques, pour lesquels l'observation est plus difficile et le contrôle de paramètres inaccessible. En particulier, les gaz quantiques de bosons sont idéaux pour l'étude de la dynamique superfluide. La superfluidité est un phénomène complexe qui est caractérisé par un ensemble de propriétés dynamiques comme l'absence de viscosité, l'existence d'une vitesse critique pour la création d'excitations et l'apparition de tourbillons quantiques en présence de rotation.

L'équipe condensats de Bose-Einstein (BEC) du Laboratoire de physique des lasers a construit un dispositif expérimental permettant d'étudier un superfluide en deux dimensions, piégé sur une surface courbée [1]. Ce système permet de contrôler très finement les paramètres expérimentaux et en particulier des états hors équilibre, comme par exemple dans un référentiel en rotation rapide, donnant accès à un régime d'écoulement supersonique [2]. Dans un superfluide, la dynamique hors équilibre se manifeste par des modes collectifs, des ondes de densité, comme par exemple des ondes sonores ou par l'apparition de vortex : des singularités où la fonction d'onde s'annule et autour desquelles la circulation du champ de vitesse est quantifiée. L'équipe BEC est spécialiste de l'étude de ces modes collectifs [3] et souhaite maintenant s'intéresser à la dynamique des vortex.

En deux dimensions, les vortex dans un superfluide bidimensionnel sont stables et peuvent être considérés comme des objets ponctuels, de taille submicrométrique. Pour étudier leur dynamique, l'équipe va se doter d'un nouveau système d'imagerie *in situ* à haute résolution, financé dans le cadre d'un projet ANR [4], qui sera mis en place et utilisé par le futur doctorant. Grâce à cet outil nous seront en mesure de réaliser deux expériences de simulation quantique :

- d'une part, dans la limite de rotation rapide, pour une densité de vortex élevée, étudier la limite de niveaux de Landau le plus bas, pour laquelle la fonction d'onde du superfluide devient analogue à celle impliquée dans l'effet Hall quantique en physique du solide ;
- d'autre part, à partir d'une distribution de vortex désordonnée, étudier les mécanismes de relaxation via les collisions entre vortex et l'émergence d'une cascade turbulente à deux-dimensions.

Ces deux études permettent de tirer parti de l'environnement très bien contrôlé et de la préparation du superfluide dans un état hors-équilibre pour réaliser une simulation d'un système analogue. La question de la relaxation dans la turbulence à deux dimensions est encore un problème ouvert en physique quantique et non-linéaire, intéressant une grande communauté internationale de chercheurs de plusieurs disciplines. Notre système expérimental est un des seuls au monde à pouvoir étudier un superfluide sur une surface courbée, une configuration particulièrement pertinente pour modéliser et tester en laboratoire les analogues superfluides de modèles de turbulence atmosphérique.

Le doctorant recruté dans le cadre de ce projet sera formé à des techniques de pointe de manipulation et de détection des fluides quantiques et développera un outil de microscopie de vortex *in situ* dont peu d'équipes ont la maîtrise au niveau mondial.

[1] Expansion of a quantum gas in a shell trap, Y. Guo et al., [NJP](#) (2022)

[2] Supersonic rotation of a superfluid: a long-lived dynamical ring Y. Guo et al., [PRL](#) (2020)

[3] Imaging the collective excitations of an ultracold gas using statistical correlations, R. Dubessy et al., [NJP](#) (2014)

[4] Projet ANR [VORTEX](#) (2023-2026)