

Projet doctoral

Ondes et turbulence dans l'hélium-4 superfluide en rotation

Motivation Proche du zéro absolu, l'hélium-4 liquide se présente dans un état superfluide connu comme He II où il a des propriétés hydrodynamiques uniques. À des températures finies entre 1 et 2 K, l'He II peut être vu comme le mélange d'un fluide normal visqueux et d'un superfluide sans viscosité, dont la vorticité est concentrée dans des tourbillons dits quantiques d'épaisseur atomique et d'intensité fixe. Quand l'He II est soumis à la rotation, ces vortex quantiques s'alignent avec l'axe de rotation et composent un réseau périodique de vortex hautement régulier, comme prédit initialement par Feynman [1]. La perturbation de ce réseau par des mécanismes externes peut donner lieu à une variété de mouvements ondulatoires dans le fluide, tels que les ondes inertielles bien connues dans les fluides classiques en rotation, mais aussi à des ondes se propageant sur un ou plusieurs vortex quantiques. L'intensification d'une telle perturbation peut déstabiliser le système, menant à un état désordonné et éventuellement à une forme de turbulence quantique en rotation.

La formation d'un réseau régulier de vortex et sa déstabilisation par une source de chaleur externe ont été récemment étudiés dans des expériences de pointe à l'Institut Néel (Grenoble) [2,3]. Dans ces expériences, de petites particules sont injectées dans une cuve remplie d'hélium-4 superfluide [Fig. 1(a)]. Ces particules sont alors piégées dans les vortex quantiques, ce qui permet la visualisation directe de ces derniers. En appliquant un flux de chaleur modéré depuis le bas de l'expérience, le réseau de vortex initialement régulier se déforme et présente des mouvements ondulatoires stables qui sont clairement visibles dans la Fig. 1(b). Ces déformations sont le résultat de l'interaction entre les vortex quantiques et le fluide normal visqueux. En effet, lorsqu'on applique un flux de chaleur dans l'hélium superfluide, cela produit un mouvement relatif entre les composantes superfluide et normale, qui permet à cette dernière d'évacuer la chaleur. Ce phénomène de contrecourant, qui n'a pas d'analogie dans les

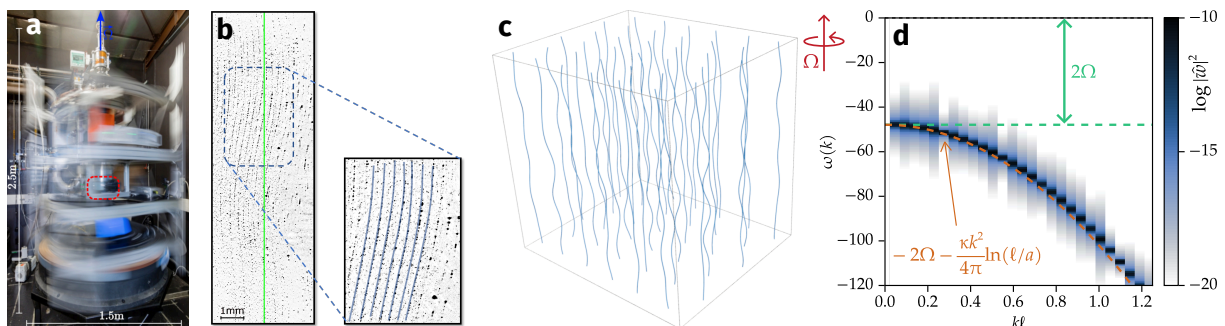


Figure 1. Ondes dans l'hélium superfluide en rotation. (a) Plateforme CryoLEM en rotation à l'Institut Néel. (b) Visualisation exp rientele d'un réseau régulier de vortex quantiques perturbé par une source de chaleur externe. (c) Simulation d'un réseau de vortex dans l'hélium en rotation avec le solveur VortexPasta.jl. (d) Spectre spatio-temporel des ondes se propageant le long des vortex quantiques. La ligne pointillée orange correspond à la relation de dispersion théorique associée aux ondes de Kelvin se propageant le long des vortex dans un superfluide en rotation.

fluides classiques, peut amplifier l'interaction entre les vortex quantiques et le fluide normal et mener potentiellement à des instabilités sur les vortex.

Lorsque le flux de chaleur est intensifié, le réseau perturbé se déstabilise et termine par se casser menant à un état turbulent. Cependant, les mécanismes précis de déstabilisation restent mal compris actuellement, ainsi que le régime turbulent final. Cela s'explique en partie par le fait que, lorsque l'on approche le régime turbulent, la visualisation directe des vortex quantiques devient très difficile, car les vortex quantiques rentrent en collision menant à des reconnections, et les particules peuvent se détacher des vortex. Par ailleurs, comprendre les mécanismes de déstabilisation nécessite une description précise des interactions bidirectionnelles entre fluide normal et vortex quantiques, qui ne peuvent pas être mesurées expérimentalement. Pour ces raisons, des simulations numériques prenant en compte ces interactions sont nécessaires pour interpréter les observations expérimentales et mieux comprendre la dynamique de l'hélium superfluide en rotation.

Objectifs L'objectif de ce projet doctoral est d'étudier la dynamique des vortex quantiques dans l'hélium superfluide en rotation à partir de simulations numériques. On se focalisera premièrement sur la limite du zéro absolu où le fluide normal est absent, et on identifiera les différents mouvements ondulatoires qui peuvent se propager sur un ou plusieurs vortex dans l'hélium en rotation comme prédit théoriquement [4]. Cela inclut les ondes de Kelvin qui se propagent longitudinalement le long des vortex [Fig. 1(c-d)], et aussi les ondes de Tkachenko qui correspondent à des déformations du réseau de vortex dans la direction transverse. Après on perturbera le système en appliquant une vitesse externe sur les vortex, jouant le rôle d'un forçage mécanique, afin d'étudier les régimes turbulents qui résultent de la combinaison de forçage et rotation au zéro absolu. En particulier, on caractérisera le rôle possible des ondes dans la turbulence quantique en rotation, et on évaluera une potentielle émergence d'une cascade inverse d'énergie vers les grandes échelles comme c'est le cas dans les écoulements classiques en rotation.

Dans la deuxième partie de ce projet, on étudiera le régime à température finie, puis pertinent pour les expériences, et où les vortex quantiques interagissent avec un fluide normal. On caractérisera premièrement la déstabilisation du réseau de vortex par un forçage thermique, avec l'objectif d'expliquer des observations expérimentales existantes et d'identifier les mécanismes responsables de l'instabilité. Les résultats numériques seront confrontés quantitativement aux mesures expérimentales à l'Institut Néel. Finalement, on étudiera le régime pleinement turbulent résultant d'un flux de chaleur intense combiné avec une rotation du système. On caractérisera la structure spatiale de cette forme de turbulence, qui pourrait être fortement anisotrope, et on réalisera des comparaisons avec des mesures de suivi de particules effectuées à l'Institut Néel dans le régime turbulent.

Méthodologie On réalisera des simulations numériques du modèle de filament de vortex (*vortex filament model*, VFM), qui est pertinent pour décrire la dynamique de vortex quantiques aux échelles macroscopiques. Le VFM décrit les vortex quantiques comme des lignes dans l'espace. Ces lignes induisent collectivement un champ de vitesse dans tout l'espace selon la loi de Biot et Savart, qui exprime la vitesse instantanée d'un point de vortex comme une intégrale le long de tous les filaments du système. Ainsi, une limitation de ce modèle est le fort coût de calcul associé à l'évaluation directe de la vitesse de tous les vortex, qui rend impossible la simulation de systèmes hautement turbulents. Nous avons récemment développé une nouvelle méthode, adaptée spécifiquement aux domaines périodiques, qui accélère dramatiquement ces évaluations en utilisant des transformées de Fourier rapides [5], et qui

peut aussi prendre en compte la rotation du système de manière précise. Cette approche est implémentée dans le solveur open-source [VortexPasta.jl](#)¹, compatible avec des accélérateurs GPU, et qui a récemment permis la simulation de turbulence quantique isotrope (en absence de rotation) à des niveaux de turbulence sans précédent [6]. Par ailleurs, pour inclure les effets de température finie, [VortexPasta.jl](#) sera couplé à un solveur Navier–Stokes décrivant le fluide normal, suivant une modélisation à deux fluides bien établie [7].

Profil attendu La/le candidat(e) doit avoir un Master en mécanique des fluides, physique, mathématiques appliquées ou un domaine connexe. Une familiarité avec les écoulements turbulents et/ou la dynamique de vortex sera la bienvenue. Une expérience solide de programmation est nécessaire. La/le candidat(e) doit également avoir des compétences de communication à l’oral et à l’écrit en anglais.

Encadrement Ce projet sera co-dirigé par [Juan Ignacio Polanco](#) (CR CNRS, LEGI) et [Mathieu Gibert](#) (CR CNRS, Institut Néel). Le projet sera mené principalement au sein de l’équipe **MOST** (Modélisation et Simulation de la Turbulence) du **LEGI** (Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels) à Grenoble, avec des visites fréquentes à l’**Institut Néel** où le travail expérimental est mené.

Financement Ce projet doctoral a reçu un financement complet de l’Université Grenoble Alpes via le programme «Contrat doctoral – Soutien et accompagnement de dynamiques scientifiques exploratoires émergentes de l’Université Grenoble Alpes 2026». Le salaire brut est de l’ordre de 2300€ par mois.

Date limite de candidature 27 mai 2026

Date de début de la thèse 1 octobre 2026

Durée du projet 36 mois

Contacts et candidature Pour plus d’informations, contacter juan-ignacio.polanco@univ-grenoble-alpes.fr et mathieu.gibert@neel.cnrs.fr en incluant un CV. Les candidatures seront faites via la plateforme **ADUM**. Le processus de recrutement est en accord avec la [charte pour une politique de recrutement ouvert, transparent et basé sur le mérite \(OTM-R\)](#) adoptée par l’Université Grenoble Alpes.

Bibliographie

- [1] R. P. Feynman, Application of Quantum Mechanics to Liquid Helium, *Progress in Low Temperature Physics* **1**, 17 (1955).
- [2] C. Peretti, J. Vessaire, É. Durozoy et M. Gibert, Direct visualization of the quantum vortex lattice structure, oscillations, and destabilization in rotating ⁴He, *Sci. Adv.* **9**, eadh2899 (2023).
- [3] J. Vessaire, C. Peretti, F. Lorin, E. Durozoy, G. Garde, P. Spathis, B. Chabaud et M. Gibert, The cryogenic Lagrangian exploration module: A rotating cryostat for the study of quantum vortices in helium II via particle seeding, *Rev. Sci. Instrum.* **97**, 25206 (2026).
- [4] E. B. Sonin, Vortex oscillations and hydrodynamics of rotating superfluids, *Rev. Mod. Phys.* **59**, 87 (1987).
- [5] J. I. Polanco, Fast and Accurate Evaluation of Biot–Savart Integrals over Spatial Curves in Periodic Domains, *SIAM J. Sci. Comput.* **47**, B822 (2025).
- [6] E. Bes, G. Balarac et J. I. Polanco, *Nonlocal energy transfer mechanism in three-dimensional quantum turbulence*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.21979> (2026).
- [7] L. Galantucci, A. W. Baggaley, C. F. Barenghi et G. Krstulovic, A new self-consistent approach of quantum turbulence in superfluid helium, *Eur. Phys. J. Plus* **135**, 547 (2020).

¹<https://github.com/jipolanco/VortexPasta.jl>