



## Les écoulements turbulents au delà de la barrière de Kolmogorov par des mesures petites échelles de 4D-PTV

**Spécialité** Mécanique des fluides

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [SPEC/SPHYNX](#)

**Candidature avant le** 31/03/2023

**Durée** 6 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [Cheminet Adam](#)  
+33 1 69 08 70 39  
[adam.cheminet@cea.fr](mailto:adam.cheminet@cea.fr)

**Autre lien**  
<https://iramis.cea.fr/Pisp/berengere.dubrulle/projects/EXPLOIT/ANREXPLOIT.html>

### Résumé

Ce stage a pour but de développer, tester et caractériser des méthodes de détections de particules pour la métrologie optique des petites structures de la turbulence, sous l'échelle dite de Kolmogorov, dans une toute nouvelle expérience de grande taille, le Giant Von Karman (GVK).

### Sujet détaillé

Les écoulements visqueux sont omniprésents dans la nature et impactent de nombreux domaines de la physique, sciences de l'ingénieur, astrophysique, géophysique et aéronautiques. On sait tous que si l'on remue suffisamment fort un écoulement visqueux, celui-ci devient turbulent, présentant ainsi des tourbillons, des structures cohérentes de différentes tailles. Leurs tailles typiques et leur organisation peut être décrit dans un spectre d'énergie, présentant des lois d'échelles logarithmiques, caractéristiques des transferts d'énergie entre les échelles. L'énergie cinétique y est injectée aux grandes échelles et dissipée aux petites échelles.

La taille typique à laquelle la dissipation s'effectue est appelée échelle de Kolmogorov et marque la transition entre un comportement en loi en puissance et une décroissance exponentielle dans la gamme des nombres d'onde. Ainsi, les échelles plus petites que l'échelle de Kolmogorov contiennent une part négligeable de l'énergie cinétique. C'est pourquoi, on pense souvent que « rien d'intéressant ne se passe sous l'échelle de Kolmogorov ». Une simulation numérique directe est ainsi pensée être bien résolue si la taille minimale de l'espacement de la grille est l'échelle de Kolmogorov. Des avancées théoriques et expérimentales [1] suggèrent cependant que beaucoup de phénomènes intéressants se trouvent sous l'échelle de Kolmogorov et cela pourrait impacter la validité des Equations de Navier-Stokes (ENS) comme modèle pour la dynamique des écoulements industrielles, géophysiques et astrophysiques.

---

En effet, sous l'échelle de Kolmogorov, des flux d'énergie peuvent toujours avoir lieu et pourrait créer une dissipation non-visqueuse, totalement indépendante de la viscosité du fluide. Cela constituerait une véritable singularité dont l'existence pourrait être à l'origine de l'anomalie dissipative bien connue depuis les années 1930 dans les écoulements turbulents. L'existence de singularités dissipatives des ENS pourrait avoir de profondes implications sur la validité des ENS comme modèle d'écoulement car la différentiabilité est perdue au niveau d'une singularité. De plus, d'après [2,3] et confirmé par des simulations numériques [4], le bruit thermique de l'agitation moléculaire du fluide pourrait concurrencer le déplacement 'macroscopique' dans ces gammes d'échelles. Plus généralement, on peut penser que la structure générale des petites échelles de la turbulence est impactée par les fluctuations thermiques, qui pourrait interagir avec le développement des quasi-singularités.

Dans le projet de l'ANR BANG, nous explorons la validité des équations de Navier-Stokes comme modèle d'écoulement en étudiant les phénomènes apparaissant sous l'échelle de Kolmogorov, en utilisant des outils multi-échelles, et des techniques de visualisations avancées 4D-Particle Tracking Velocimetry (4D-PTV) dans une expérience de grande taille appelée Giant Von Karman (GVK) construite au CEA. Par sa taille, GVK est parfaitement adaptée à l'exploration des petites échelles puisque la taille de Kolmogorov y est de l'ordre du millimètre. Pour accéder aux petites échelles, nous allons effectuer plusieurs campagnes de mesures 4D-PTV dans GVK, avec une forte densité particulaire, mais également des optiques non conventionnelles, tel que les objectifs télécentriques avec des grossissements de l'ordre de 2, testé au LMFL. Dans ces conditions optiques, l'étape la plus difficile que les algorithmiques de 4D-PTV doivent surmonter correspond à la détection de particules dans les images. Identifier les particules dans des images denses est le point fondamental de la méthode 4D-PTV. C'est un problème difficile épineux où le chevauchement des particules dans les images crée des biais de localisation, des particules manquées et des faux positifs (appelées particules fantômes). Comme il faut augmenter la densité pour améliorer la résolution de nos mesures, le chevauchement de particules dans les images devient un des obstacles principaux à surmonter dans la perspective de passer sous la barrière de Kolmogorov.

Le but de ce stage est de développer, tester, et caractériser des méthodes de détection de particules, spécifiquement adaptée à la haute densité, et fort chevauchement. Le stagiaire construira ces outils en se basant sur différents outils et algorithmes déjà existants à l'ONERA pour la détection et la localisation de particule par vues multiples [5], afin de pouvoir analyser des images expérimentales issues de GVK. En premier lieu, le stagiaire aura pour tâche de créer un ensemble de données benchmark, qui ressembleront le plus possible au setup expérimental. Cet outil de benchmark servira pour la phase initiale de paramétrage des outils de détection et post-processing, avant de l'appliquer sur de vraies données expérimentales issues de GVK. Ce stage est la première étape vers une thèse dédiée à la découverte des phénomènes sous l'échelle de Kolmogorov.

### **Mots clés**

Turbulence, Métrologie optique, Méthodes inverses

### **Compétences**

### **Logiciels**

Matlab, C, Cuda

---

## Turbulent flows beyond the Kolmogorov barrier through small scale 4D-PTV measurements

### Summary

The goal of this internship is to develop, test and assess particle detection methods specifically designed for the optical measurement of sub-Kolmogorov small scale structures of turbulence, in a new experimental facility : Giant Von Karman (GVK).

### Full description

Viscous flows are ubiquitous in nature and impact many areas of physics, engineering sciences, astrophysics, geophysics, or aeronautics. If you stir strongly enough a viscous flow, it becomes turbulent and displays vortices and coherent structures of various sizes. Typical sizes and organization of such structures can be described by a power-law energy spectrum characteristic of a scale-to-scale energy transfer, by which all the energy injected at large scale is transferred and dissipated at small scale.

The typical scale for energy dissipation is called the Kolmogorov scale and marks the transition between the power law behavior and a steep exponential decay in the wavenumber range. Therefore, scales smaller than the Kolmogorov scale contain a negligible fraction of the kinetic energy. Because of that, it is often thought that scales below are irrelevant and that “nothing interesting is happening below the Kolmogorov scale”. For a long time, a direct numerical simulation of a viscous fluid was thought to be “well resolved” if its minimal grid spacing is Kolmogorov scale. Recent theoretical and experimental advances however suggest that many interesting phenomena do happen below the Kolmogorov scale [1] and this may impact the validity of Navier-Stokes equations (NSE) as model for the dynamics of industrial, geophysical or astrophysical fluids.

Indeed, below the Kolmogorov scale, energy fluxes can still happen and could create a non-viscous dissipation totally independent of the fluid viscosity. This would constitute genuine dissipative singularities which existence could be the origin of the well-known dissipative anomaly in turbulent flows. Existence of dissipative NSE singularities may have profound implications on the validity of NSE as a model of fluid, as differentiability is lost at this point. Furthermore, following [2,3] and confirmed by numerical simulations [4], thermal noise from the molecular agitation of the fluid could compete with macroscopic motions at scales below the Kolmogorov scale. More generally, we may think that the whole structure of small-scale turbulence is affected by thermal fluctuations that may impact or impede the development of quasi-singularities.

In the BANG project funded by the French National Research Agency, we explore the validity of the Navier-Stokes equation as a fluid model by studying the phenomena occurring below the Kolmogorov scale, using multi-scale tools and advanced visualization techniques, ie 4D Particle Tracking Velocimetry (4D-PTV), in a dedicated large turbulent experiment called Giant Von Karman (GVK) built at CEA (see Figure 1). By the sheer size of the experiment, it is perfectly tailored for the exploration of small scales as the Kolmogorov scale is of the order of 1 mm. To access small scales, we plan to carry out several 4D-PTV measurement campaigns in GVK, using high particle densities as well as unconventional optical conditions with telecentric lenses allowing for a magnification of 2 tested at LMFL. Under such optical conditions, the most difficult step 4D-PTV algorithms have to face resides in the image particle detection. Identifying particles in dense images is indeed the cornerstone of the 4D-PTV method. It is a challenging chicken-and-egg problem, where overlapping particle images generate biased particle localizations, missed particles and false positives (also known as “ghost particles”). As seeking for smaller turbulent scales can only be done by increasing the particle density, this particle image overlapping is thus identified as one of the main challenges that has to be tackled in the perspective of breaking the Kolmogorov barrier.

This internship’s aim is to develop, test and assess such a particle detection method for the problem of thermal noise characterization in order to increase the spatial resolution. The intern will build on the different algorithms and tools developed at ONERA for multiview particle detection and localisation [5] in order to process and analyze the experimental image data from GVK. At first, she/he will be in charge of creating the preliminary benchmark scenario and datasets that mimics the main features of the experimental setup. This scenario will be the basis for preliminary

---

tuning of the processing tools before the intern handles experimental data processing and analysis from the GVK facility. The internship is the first step toward a full PHD position devoted to the discovery of sub Kolmogorov phenomena.

[1] [D19] Dubrulle B. Beyond Kolmogorov, J. Fluid Mech. Perspectives (2019).

[2] R. Betchov On the fine structure of turbulent flows, JFM 3 205-216 (1957); <https://doi.org/10.1017/S0022112057000579>

[3] R. Betchov Measure of the Intricacy of Turbulence The Physics of Fluids 7, 1160 (1964); <https://doi.org/10.1063/1.1711356>

[4] Eyink et al Dissipation-Range Fluid Turbulence and Thermal Noise (2021). <https://arxiv.org/abs/2107.13954>

[5] Cornic et al Double-frame tomographic PTV at high seeding densities Experiments in Fluids,61:23 (2020).

### **Keywords**

Turbulence, Optical Metrology, Inverse Methods

### **Skills**

### **Softwares**

Matlab, C, Cuda