

Etude sur le flottement tourbillonnaire *Treatise on the Meandering of Vortices*

Soutenance de thèse – Tobias Bolle

Judi 03 juin 2021 à 14 H 00

Visioconférence Zom

<https://ecolepolytechnique.zoom.us/j/84962867937?pwd=bjB3bndxL1NrbUJMSlByRUlyQyt1dz09>

Devant le jury composé de :

- **Directeur de Thèse :**
 - * Laurent JACQUIN (Directeur scientifique), ONERA DSG, Palaiseau, France
- **Co-Directeur de Thèse :**
 - * Denis SIPP (Adjoint scientifique), ONERA DAAA/MAAA, Meudon, France
- **Rapporteurs :**
 - * Stéphane LE DIZÈS (Directeur), IRPHE, Marseille, France
 - * Gert J. F. VAN HEIJST (Professeur), TU Eindhoven, Eindhoven, Pays-Bas
- **Examineurs :**
 - * Pierre BRANCHER (Professeur), IMFT, Toulouse, France
 - * Carlos DEL PINO (Professeur), Université de Málaga, Málaga, Espagne
- **Encadrants :**
 - * Vincent BRION (Ingénieur de recherche), ONERA DAAA/AMES, Meudon, France
 - * Jean-Christophe ROBINET (Professeur), ENSAM, Paris, France

---0---

Résumé / Abstract

Le "meandering" est une manifestation de l'instationarité tourbillonnaire, observée dans les expériences depuis les années 1970, qui reste mal comprise. L'objectif de la présente étude est de décrire et d'expliquer le phénomène. Le "meandering" est le déplacement latéral, apparemment aléatoire, du tourbillon dans son ensemble, connu pour divers écoulements tourbillonnaires. Dans le cas d'un tourbillon marginal, le mouvement est toujours associé avec les caractéristiques suivantes :

- (i) croissance d'amplitude en aval,
- (ii) coexistence d'une signature spectrale large bande universelle et d'une organisation progressive,
- (iii) concentration et amplification graduelles de l'énergie de fluctuation dans le tourbillon.

La signature spectrale est un témoignage du "retour à l'ordre" ; c'est-à-dire que l'évolution typique du sillage augmente progressivement l'ordre en dehors d'une dynamique complexe proche de l'aile.

.../...

Nous quantifions le niveau d'ordre en faisant appel à l'entropie et à l'analyse des séries temporelles non-linéaires. Une analyse du nombre de Rossby révèle des similarités avec l'évolution de la turbulence dans les expériences d'écoulement en rotation.

En ce qui concerne la croissance d'amplitude, nous avons des preuves expérimentales que la loi "amplitude~ intensité de la turbulence $x\sqrt{\text{temps/circulation}}$ " est universellement valable. Celle-ci suggère un mouvement Brownien du tourbillon dans son ensemble. Nous modélisons la dynamique des tourbillons marginaux comme la *réceptivité généralisée* du tourbillon à l'excitation de l'écoulement libre. Une décomposition en modes orthogonaux (POD) de la base de données expérimentale montre que les principales perturbations correspondent à une paire de dipôles de déplacement dans le cœur. L'énergie des perturbations croît en aval au détriment du champ moyen.

Théoriquement, nous résolvons les équations de Navier-Stokes linéarisées dans l'espace de Fourier avec la résolvante. Dans ce cadre, la *non-normalité est nécessaire* pour la réceptivité. Ce prérequis montre que le forçage pertinent est corrélé à la couche critique. L'archétype de réceptivité est constitué de filaments de faible énergie enroulés autour de la couche critique, qui excitent les perturbations du cœur, aspirant l'énergie du champ moyen.

Meandering is a manifestation of vor-tex unsteadiness observed in experiments since the 1970s which remains puzzling in essential aspects. The objective of the present study is to describe and explain the subject matter - Why meander vortices? Vortex meandering is the lateral, apparently random motion of the vortex as a whole, documented for various flows. In the case of trailing vortices, the motion is always associated with the following characteristics:

- (i) *downstream amplitude growth,*
- (ii) *coexistence of a universal broadband spectral signature and progressive organization,*
- (iii) *gradual concentration and amplification of the fluctuation energy in the vortex.*

The spectral signature is a testimony of the 'return to order'; that is, the typical evolution of wing wakes progressively increases orderliness out of a complex state close to the wing. We quantify the level of orderliness by appeal to the entropy and nonlinear time-series analysis. An analysis of the Rossby number reveals striking parallels to the turbulence evolution in rotating-tank experiments.

As regards the amplitude growth, we have considerable experimental evidence that 'amplitude ~ turbulence intensity $x\sqrt{\text{time/circulation}}$ ' holds universally. This behaviour is strongly reminiscent of a Brownian motion of the vortex as a whole. We model trailing-vortex dynamics as the generalized receptivity of the vortex to excitation from the free stream. Proper Orthogonal Decomposition of the experimental database shows that the leading perturbations correspond to a pair of displacement-wave dipole patterns in the core. The energy in the perturbation space spanned by these two modes grows downstream at the expense of the mean flow.

As a theoretical model, we formally solve the linearised Navier-Stokes equations in Fourier space using the resolvent. In this framework, non-normality is necessary for receptivity. This prerequisite shows that the pertinent forcing is correlated with the critical layer. The receptivity archetype consists of low-energy filaments around the critical layer, which excite core perturbations, sucking energy from the mean flow.

---0---

Mots clés / Keywords

FLOTTEMENT TOURBILLONNAIRE, RESOLVANTE, ANALYSE DU SERIE TEMPORELLE, MOUVEMENT BROWNIEN

VORTEX MEANDERING, RESOLVENT, NONLINEAR TIME-SERIES ANALYSIS, BROWNIAN MOTION