

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Effect of stratification on the dynamics of trailing vortices

Référence : **MFE-DAAA-2022-10**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2022

Date limite de candidature : 30/05/2022

Mots clés

Vortex dynamics, atmospheric stratification

Profil et compétences recherchées

- Master 2 or Engineering degree + Master 2
- Fluid mechanics, experimental fluid dynamics, flow measurements, data processing, programming, data analysis

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Wing-tip vortices are of particular interest in aeronautical applications due to their significant contribution to the overall drag of an aircraft [1] and to their persistence in flight corridors and runways which poses a potential hazard and a flight safety concern. The wake vortices are also suspected to play a crucial role in the dilution and transport of contrails released by aircrafts. As these contrails form by condensation of jet exhausts [2] they undergo wrapping, shearing and instabilities by the couple of trailing vortices [3] which leads to increased diffusion and differential distribution and position of the ice panache in the atmosphere.

Of interest here is the role that **atmospheric stratification** plays in the dynamics of these trailing vortices. Density stratification induces gravity effects in the course of the wake descent throughout the atmosphere that is known to alter the descent profile and change the thresholds and wavelength of the common instabilities of the unstratified case [3,8], namely the short and long, otherwise known as Widnall and Crow, instabilities [1,5]. Recent theoretical work [11] confirms that stronger stratification favor shorter wavelengths destabilization of the vortex wake.

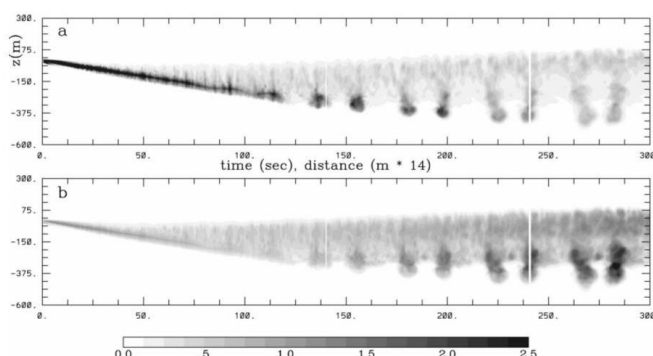
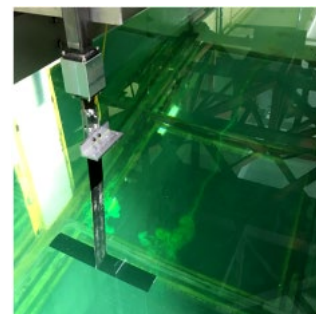


Fig. 2. Downstream space/time vs height plot of cross-stream integrated fields for a simulated B747 contrail with $RH_c = 130\%$ (simulation A30b). (a) Integrated ice crystal number density in 10^{14} m^{-2} ; (b) integrated ice mass density in g m^{-2} .



(a)

(b)

Figure 1 – (a) Downstream space/time vs height plot of cross-stream integrated fields for a simulated B747 contrail with stratification [3]. (b) Wing model in ONERA Lille towing tank

The problem at stake is that of longitudinal vortices in a vertically stratified fluid. Such a problem is determined by the Froude number which scales as the vortex circulation divided by the vortex separation and Brunt-Vaisala frequency (BVF), the stratification parameter. Infinite Froude number indicate an homogeneous situation while low Froude numbers correspond to strong gravity effects on the vortex dynamics. Realistic case of stratification encountered by aircrafts can lead to medium to strong stratification effects.

Literature shows various investigations of this stratification effect, yet several important questions persist.

The first one is that of the **importance of the stratification in the near field of the wake** generated by the lifting body. Most studies overlook this problem and hypothesize a wake configuration that neglects stratification in the early stage of the wake. In fact the threshold must be precisely determined as it could possibly affect the state of the wake and its dynamical properties.

The second question is that of the confirmation that the theoretical result obtained by Ortiz et al. [11], concerning the **stability properties of the wake in presence of stratification**, are well observed in **higher Reynolds number flows**. The experimental work of Delisi [8] suggests that it is the case but it provides no indication of the flow structure that stands behind the shorter wavelength dynamics. In particular the role of the secondary wake formed by baroclinic torque above the vortices in mild to strong stratification deserves fundamental interest to understand its formation and interaction with the primary vortices.

To answer these questions, we propose to run an experimental analysis of the dynamics of wake vortices in a towing tank experiment. Such an experiment allows to investigate the wake from its formation down to large distances, therefore it is highly suited to investigate :

- The importance of stratification in the formation of the vortex wake
- The threshold and leading wavelengths of the vortex instabilities upon stratification effects
- The nature of the secondary wake that forms above the main vortices and its role in the destabilization processes

The experimental analysis will be conducted in the parametric range of the Froude number and by varying one by one the wake parameters (circulation, vortex distance) relatively to this stratification parameter. 2 experimental apparatus will be used, first a small scale lab experiment for stratified flows and then the methodology will be transposed to the towing tank experiment which has been developed in recent years at ONERA Lille center to investigate vortex wakes [9], see figure 1.

A close scrutiny of the flow will be made using stereoscopic PIV measurements in sections of the flow. The PIV flow fields will be used to characterize the extent of the flow depending on the Froude number and the dominant modes by applying modal decomposition techniques (POD).

The PhD program will initially start with the development of a small scale lab experiment for stratified flows with longitudinal vortices with in a way similar to the one used by Roy et al. [5] before implementing stratification in ONERA Lille towing tank. Preliminary work will also consider numerical simulation of the wake flow behind a rectangular wing to investigate the initial wake dynamics in a stratified flow. These simulations will help prepare and guide the experimental work.

Collaborations envisages: LMFL

References:

- [1] Spalart, P. R. (1998) "Airplane trailing vortices" *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 30, no 1
- [2] Paoli, R. & Shariff, K. (2016). "Contrail modeling and simulation" *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 48
- [3] D. Lewellen & W. Lewellen (2001) "The effects of aircraft wake dynamics on contrail development," *Journal of the atmospheric sciences*, vol. 58, no. 4
- [4] Crow, S. C. "Stability theory for a pair of trailing vortices" *AIAA Journal*, 1970, vol. 8, no 12
- [5] Roy, C., Leweke, T., Thompson, M. C., and Hourigan, K. (2011) "Experiments on the elliptic instability in vortex pairs with axial core flow" *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 677
- [6] Holzäpfel, F. (2014). "Effects of environmental and aircraft parameters on wake vortex behavior". *Journal of Aircraft*, 51(5),
- [7] Nomura, K. K., Tsutsui, H., Mahoney, D., & Rottman, J. W. (2006) "Short-wavelength instability and decay of a vortex pair in a stratified fluid". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 553
- [8] Delisi D.P., Robins R.E. (2000) "Short-Scale Instabilities in Trailing Wake Vortices in a Stratified Fluid", *AIAA Journal*, vol. 38
- [9] Cruz Marquez, R., Monnier, J. C., Tanguy, G., Couliou, M., Brion, V., Cattafesta, L., & Dupont, P. (2021). "An experimental study of a trailing vortex alleviation using an undulated trailing edge".. *AIAA AVIATION 2021 FORUM*
- [10] Leweke, T. & Williamson, C. H. (2011). "Experiments on long-wavelength instability and reconnection of a vortex pair". *Physics of Fluids*, 23(2)

[11] Ortiz, S., Donnadieu, C., & Chomaz, J. M. (2015). "Three-dimensional instabilities and optimal perturbations of a counter-rotating vortex pair in stratified flows". *Physics of Fluids* vol. 27(10)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Département Aérodynamique Aéroélasticité Acoustique (DAAA)

Lieu (centre ONERA) : ONERA Meudon et Lille

Contact : Marie Couliou et Geoffrey Tanguy

Tél. : 01 46 23 51 19 Email :
marie.couliou@onera.fr, geoffrey.tanguy@onera.fr

Directeurs de thèse

Nom : Vincent Brion, Jean-Philippe Laval

Laboratoire : ONERA / LMFL

Tél. : 01 46 23 51 64

Email :vincent.brion@onera.fr,
jean-philippe.laval@centralelille.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>

NOTA :

La proposition de sujet de thèse est destinée à être publiée et doit être rédigée à destination des candidats. Eviter les acronymes et le jargon technique. Mettre en avant les compétences qui seront acquises au cours de la thèse.

La motivation de la proposition de sujet et les compléments à destination de la DSG sont à renseigner ci-dessous.

Le sujet doit impérativement être validé par le département du proposant et diffusé à la DSG par l'intermédiaire de l'Adjoint Scientifique.

PARTIE DESTINEE EXCLUSIVEMENT A LA DSG

Les rubriques suivantes doivent être dûment renseignées :

1. Domaine et thématique scientifique, défi et feuille de route adressés

Domaine scientifique principal (MAS / MFE / PHY / SNA / TIS) : MFE

Thématique scientifique principale (liste [ici](#)) : Dynamique des écoulements libre

Défi du PSS (liste [ici](#)) : Vers la maîtrise de la turbulence (4)

Feuille(s) de route (liste [ici](#)) : 2. Réduction de l'empreinte environnementale du transport aérien,

2. Objet de la thèse

Trailing wake vortices in a stratified fluid

3. Descriptif de la thèse

a. Quels sont les problèmes qui se posent ?

Les tourbillons de bout d'aile sont particulièrement intéressants dans le cadre des applications aéronautiques en raison de leur contribution significative à la traînée globale d'un aéronef et de leur persistance dans les couloirs aériens et les pistes, ce qui représente un danger potentiel et un problème de sécurité des vols. Les tourbillons de sillage jouent également un rôle crucial dans l'évolution des traînées de condensation générées par les avions. Ces traînées -qui résultent de la condensation des échappements de jet- sont entraînées par l'enroulement tourbillonnaire et leur dynamique est alors liée à celle des tourbillons et aux instabilités associées. Ceci peut entraîner une diffusion accrue et une distribution différentielle du panache de glace dans l'atmosphère.

Que ce soit pendant les phases d'approches ou de vol de croisière, la dynamique des tourbillons de sillage générés par un avion est dépendante des conditions environnementales et météorologiques telles que le vent, le taux de turbulence et la stratification. Une stratification en densité induit des effets de gravité au cours de la descente du sillage et va jouer sur la dynamique, la cinétique et la topologie du sillage. Le rôle que joue la stratification atmosphérique dans la dynamique de ces tourbillons de bout d'aile est ainsi particulièrement important.

b. Quel est l'état de l'art ?

Dans un environnement non stratifié, un avion génère un dipôle de tourbillons contrarotatifs. Au fur et à mesure que l'avion s'éloigne, cette paire de tourbillons descend et développe possiblement (cela dépend du taux de turbulence ambiant, essentiellement) deux types d'instabilités (tridimensionnelles), une à grande longueur d'onde [1] et une à faible longueur d'onde [2]. La connaissance du taux de décroissance de ces tourbillons en incluant les effets des conditions atmosphériques telles que la stratification de la densité est essentielle pour correctement caractériser le sillage d'un avion [3]. La stratification atmosphérique est connue pour modifier le profil de descente et changer les seuils d'apparition et la longueur d'onde des

instabilités communes du cas non stratifié [4,5], à savoir les instabilités courte et le grande longueur d'onde, aussi appelée Widnall et Crow [1,6]. Des travaux théoriques récents [7] confirment qu'une stratification plus forte favorise la déstabilisation des longueurs d'onde plus courtes du sillage tourbillonnaire. Des résultats numériques suggèrent également que la stratification réduit la descente des tourbillons [8] mais très peu d'expériences existent [5] valider ces résultats.

- [1] Crow, S. C. "Stability theory for a pair of trailing vortices" *AIAA Journal*, 1970, vol. 8, no 12
- [2] Roy, C., Leweke, T., Thompson, M. C., and Hourigan, K. (2011) "Experiments on the elliptic instability in vortex pairs with axial core flow" *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 677
- [3] Holzäpfel, F. (2014). "Effects of environmental and aircraft parameters on wake vortex behavior". *Journal of Aircraft*, 51(5),
- [4] D. Lewellen & W. Lewellen (2001) "The effects of aircraft wake dynamics on contrail development," *Journal of the atmospheric sciences*, vol. 58, no. 4
- [5] Delisi D.P., Robins R.E. (2000) "Short-Scale Instabilities in Trailing Wake Vortices in a Stratified Fluid", *AIAA Journal*, vol. 38
- [6] Spalart, P. R. (1998) "Airplane trailing vortices" *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 30, no 1
- [7] Ortiz, S., Donnadieu, C., & Chomaz, J. M. (2015). "Three-dimensional instabilities and optimal perturbations of a counter-rotating vortex pair in stratified flows". *Physics of Fluids* vol. 27(10)
- [8] Nomura, K. K., Tsutsui, H., Mahoney, D., & Rottman, J. W. (2006) "Short-wavelength instability and decay of a vortex pair in a stratified fluid". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 553

c. Quels sont les objectifs généraux et les perspectives au-delà de la thèse proprement dite ?

Les cas réalistes de stratification rencontrés par les avions peuvent conduire à des effets de stratification moyens à forts. L'objectif est d'identifier la sensibilité du sillage et son évolution dans des contextes non homogènes, plus réalistes vis-à-vis des situations rencontrées en vol en se focalisant sur les effets d'une stratification stable.

4. Programme de la thèse

a. Quelles sont les questions scientifiques traitées ?

Bien qu'il existe différentes études sur l'effet de la stratification sur les tourbillons de bout d'aile, plusieurs questions importantes persistent.

La première est celle de l'importance de la stratification en champ proche du sillage généré par l'objet portant. La plupart des études négligent ce problème et émettent l'hypothèse d'une configuration de sillage qui néglige la stratification au début du sillage. Le seuil où cette hypothèse est réalisée doit néanmoins être déterminé avec précision car il pourrait éventuellement affecter l'état du sillage et sa dynamique.

La seconde question est celle de la confirmation que le résultat théorique obtenu par Ortiz et al. [7], concernant les propriétés de stabilité du sillage en présence de stratification, sont bien observées dans les écoulements à plus grand nombre de Reynolds. Le travail expérimental de Delisi [5] suggère que c'est le cas mais il ne fournit aucune indication de la structure de l'écoulement qui se cache derrière la dynamique de longueur d'onde plus courte. En particulier, le rôle du sillage secondaire formé par le couple barocline au-dessus des tourbillons dans une stratification légère à forte mérite une étude plus poussée pour comprendre sa formation et son interaction avec les tourbillons primaires.

b. Quelles sont les approches scientifiques proposées : point de départ des travaux, démarches envisagées, moyens mis en œuvre ou expérimentations prévues ?

Pour répondre à ces questions, l'approche proposée est essentiellement expérimentale. L'analyse expérimentale sera conduite dans le domaine paramétrique du nombre de Froude, en faisant varier

un à un les paramètres de sillage (circulation, distance vortex) par rapport au paramètre de stratification.

Deux montages expérimentaux seront utilisés. Le point de départ sera une expérience de laboratoire à petite échelle pour étudier la mise en place de la stratification, sa mesure et son effet sur un dipôle de tourbillon. Un examen minutieux de l'écoulement sera effectué à l'aide de mesures PIV stéréoscopiques dans l'écoulement. Les champs d'écoulement PIV seront utilisés pour caractériser l'étendue de l'écoulement en fonction du nombre de Froude et des modes dominants en appliquant des techniques de décomposition modale (POD).

Cette montée en compétence sur la stratification une fois faite, elle sera ensuite transposée à une installation plus grande échelle, le bassin de traction du centre ONERA à Lille (installation dans le périmètre de l'unité DAAA/ELV). Dans le cadre d'une précédente thèse (Rolando Cruz Marquez), différentes options de montage ont été mises au point (loi de charge, vitesse maquette, incidence) pour étudier la dynamique de tourbillon de bout d'aile. De manière similaire que pour l'étude sur la petite expérience de laboratoire, des mesures par techniques de PIV seront réalisées et complétées par des mesures de pesée maquette. Un système de sonde sera ajouté au montage pour mesurer précisément le profil de stratification

Le programme prévu est le suivant:

Année 1 :

- analyse bibliographique (expérience de stratification, dynamique tourbillonnaire, théorie des instabilités tourbillonnaires (Crow, Widnall) et croissances transitoires)
- simulations numériques préliminaire (simulations analogues à celles du thésard Pierre Saulgeot)
- Essais de stratification seule et sa mesure dans l'expérience de laboratoire
- Essais de stratification avec un dipôle de tourbillon dans l'expérience de laboratoire en variant d'une part le nombre de Froude Fr , d'autre part le gradient de densité

Année 2:

- Post-traitement des données expérimentales de la manip de labo
- Adaptation du montage de stratification au bassin de traction (ajout du système de stratification +de mesure de stratification)
- Essais de stratification seule et sa mesure au bassin de Lille
- rédactions d'article scientifique sur la configuration manip de labo

Année 3 :

- Essais de stratification avec aile tractée u bassin de Lille (PIV + Pesée en variant d'une part le nombre de Froude Fr , d'autre part le gradient de densité)
- Simulation numériques complémentaires
- rédactions d'articles scientifiques et de la thèse

c. Résultats attendus

- Maîtrise de moyens d'essais avec stratification
- Base de données expérimentales (PIV, effort)
- Meilleure compréhension de l'impact de la stratification sur un dipôle de tourbillon

5. Références

- [1] Spalart, P. R. (1998) "Airplane trailing vortices" *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 30, no 1
- [2] Paoli, R. & Shariff, K. (2016). "Contrail modeling and simulation" *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 48
- [3] D. Lewellen & W. Lewellen (2001) "The effects of aircraft wake dynamics on contrail development," *Journal of the atmospheric sciences*, vol. 58, no. 4
- [4] Crow, S. C. "Stability theory for a pair of trailing vortices" *AIAA Journal*, 1970, vol. 8, no 12
- [5] Roy, C., Leweke, T., Thompson, M. C., and Hourigan, K. (2011) "Experiments on the elliptic instability in vortex pairs with axial core flow" *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 677
- [6] Holzäpfel, F. (2014). "Effects of environmental and aircraft parameters on wake vortex behavior". *Journal of Aircraft*, 51(5),
- [7] Nomura, K. K., Tsutsui, H., Mahoney, D., & Rottman, J. W. (2006) "Short-wavelength instability and decay of a vortex pair in a stratified fluid". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 553
- [8] Delisi D.P., Robins R.E. (2000) "Short-Scale Instabilities in Trailing Wake Vortices in a Stratified Fluid", *AIAA Journal*, vol. 38
- [9] Cruz Marquez, R., Monnier, J. C., Tanguy, G., Couliou, M., Brion, V., Cattafesta, L., & Dupont, P. (2021). "An experimental study of a trailing vortex alleviation using an undulated trailing edge".. *AIAA AVIATION 2021 FORUM*
- [10] Leweke, T. & Williamson, C. H. (2011). "Experiments on long-wavelength instability and reconnection of a vortex pair". *Physics of Fluids*, 23(2)
- [11] Ortiz, S., Donnadiou, C., & Chomaz, J. M. (2015). "Three-dimensional instabilities and optimal perturbations of a counter-rotating vortex pair in stratified flows". *Physics of Fluids* vol. 27(10)

6. Compléments

- a. Personnes participant à l'encadrement en plus des (co)directeur(s) de thèse
Marie Couliou (DAAA/AMES) et Geoffrey Tanguy (DAAA/ELV)
- b. Liens avec des projets de recherche et/ou avec d'autres thèses menées à l'ONERA
Convexion Aviation Climat, ARF-C "Impact et Décarbonation", PRF EASA, ARF TUBA
- c. Verrous scientifiques ou techniques, risques potentiels

Verrous scientifiques ou techniques :

- Techniques et mesures de stratification
- Mesures de la dynamique tourbillonnaire

risques potentiels :

- indisponibilité du bassin de traction
- indisponibilité du matériel/personnel pour la PIV
- méthode de stratification inadéquate/inefficace

- d. Objectif de valorisation des travaux

Conférences + articles dans des revues à comité de lecture

7. Financement envisagé

Cocher dans la colonne de droite

Type de bourse	
----------------	--

ONERA	x
DGA	<input type="checkbox"/>
CNES	<input type="checkbox"/>
Région	x
CIFRE (préciser ci-dessous le financeur et éventuellement le candidat envisagé)	<input type="checkbox"/>
Contrat doctoral (préciser ci-dessous le % de financement extérieur attendu)	<input type="checkbox"/>
Autre (préciser ci-dessous le financeur et le % de financement extérieur attendu)	<input type="checkbox"/>

Précisions sur le financement : 50% Haut de France, 50% ONERA

Candidat éventuel :