Contrôle des tourbillons de bout d'aile par injection de jet inhomogène

PARTENAIRES

AIRBUS LATECOERE

Mots-clés : Tourbillon d'extrémité d'aile, Dynamique des tourbillons, Contrôle d'écoulement, Mécanique des fluides expérimentale, PIV, Impact climatique

Département : DAEP

Ce projet expérimental vise à étudier le contrôle des tourbillons d'extrémité d'aile par l'injection de jets à densité variable dans le cœur tourbillonnaire, dans l'objectif d'accélérer leur déstabilisation et leur dissipation. Cette approche est motivée par la pertinence applicative significative de tels tourbillons, qui contribuent à la formation de traînées de condensation dans les sillages d'aéronefs et, par conséquent, au forçage radiatif induit par l'aviation. La technique de diagnostic principale employée est la Vélocimétrie par Imagerie de Particules (PIV) résolue en temps, permettant une quantification précise de la réponse dynamique du tourbillon aux perturbations induites. Le projet s'appuie sur des résultats numériques récents du groupe de recherche, ayant mis en évidence un potentiel de croissance transitoire considérable dans les tourbillons à densité variable, ainsi que sur des mesures expérimentales préliminaires déjà réalisées avec succès sur le banc d'essai du département.

DESCRIPTION DU POSTE :

Les tourbillons d'extrémité d'aile sont un sous-produit fondamental de la génération de portance sur les ailes finies et constituent l'une des structures cohérentes les plus persistantes et dynamiquement riches de l'aérodynamique. Ces tourbillons peuvent se maintenir sur de longues distances en aval, conservant une vorticité significative et induisant des champs de vitesse qui affectent la sécurité

aérienne, les opérations aéroportuaires et les processus atmosphériques. Sous certaines conditions thermodynamiques, les tourbillons d'extrémité d'aile interagissent avec les panaches des gaz d'échappement des moteurs, entraînant de l'humidité et des particules, contribuant ainsi à la formation et à la persistance des traînées de condensation (contrails). Ces traînées sont désormais reconnues comme un contributeur non négligeable au forçage radiatif induit par l'aviation, avec des implications pour le changement climatique.

Atténuer la durée de vie et l'intensité des tourbillons d'extrémité d'aile présente donc un intérêt à la fois fondamental et appliqué. Si les approches traditionnelles se sont concentrées sur des modifications géométriques passives (par exemple, les winglets), les stratégies de contrôle actif de l'écoulement restent comparativement peu explorées, notamment d'un point de vue expérimental. Ce projet vise à étudier une nouvelle approche de contrôle basée sur l'injection de jets à densité différente de celle de l'air ambiant directement dans le cœur tourbillonnaire. En modifiant l'équilibre de densité et de quantité de mouvement au sein du tourbillon, cette approche cherche à accélérer sa déstabilisation et sa dissipation. La Vélocimétrie par Imagerie de Particules (PIV) à haute résolution temporelle sera employée pour quantifier la réponse dynamique du tourbillon à de telles perturbations.

La structure et l'évolution des tourbillons d'extrémité d'aile ont été largement étudiées au cours des dernières décennies. Les travaux fondateurs (par exemple, Spalart, 1998 ; Gerz et al., 2002) ont caractérisé leur formation, leur persistance et leurs mécanismes d'instabilité. Des investigations expérimentales ultérieures (par exemple, Devenport et al., 1996 ; Jacquin et al., 2001) ont fourni des mesures détaillées de la structure du cœur tourbillonnaire et des caractéristiques de turbulence, mettant en évidence le rôle de la turbulence ambiante et de la stratification sur la dissipation des tourbillons.

Le contrôle actif des tourbillons de sillage a été exploré à l'aide de diverses techniques, notamment les jets pulsés, les actionneurs plasma et les dispositifs de soufflage/aspiration (par exemple, Greenblatt et Wygnanski, 2000 ; Crouch, Garbaruk et Magidov, 2007). Cependant, la plupart des études se sont concentrées sur une actuation basée sur la quantité de mouvement avec des jets de densité identique à celle du fluide environnant. L'effet des variations de densité au sein de structures tourbillonnaires cohérentes reste comparativement peu exploré, malgré sa pertinence dans les écoulements géophysiques et compressibles.

Les avancées récentes en PIV résolue en temps (Adrian et Westerweel, 2011) ont permis un accès sans précédent à la dynamique temporelle des écoulements tourbillonnaires, permettant l'étude des instabilités transitoires et des modifications induites par le contrôle. Néanmoins, l'utilisation combinée de l'injection de jets à densité variable et de la PIV volumétrique ou planaire à haute cadence pour l'étude du contrôle tourbillonnaire est encore largement absente de la littérature, représentant une lacune significative que ce projet vise à combler.

Des investigations numériques récentes menées par notre équipe (Sablon et al., 2026) ont démontré le potentiel de croissance transitoire significatif des tourbillons à densité variable (voir Fig. 1). Ces résultats mettent en évidence la sensibilité de telles structures tourbillonnaires aux perturbations de densité, suggérant une voie prometteuse pour des stratégies de contrôle basées sur une injection ciblée. En parallèle, des mesures expérimentales préliminaires sans contrôle ont déjà été réalisées avec succès sur le banc d'essai de notre département (voir Fig. 1).

Ces éléments constituent ensemble une base solide pour la campagne expérimentale proposée et soutiennent la pertinence d'une investigation approfondie des effets de densité variable à l'aide de techniques de diagnostic résolues en temps.

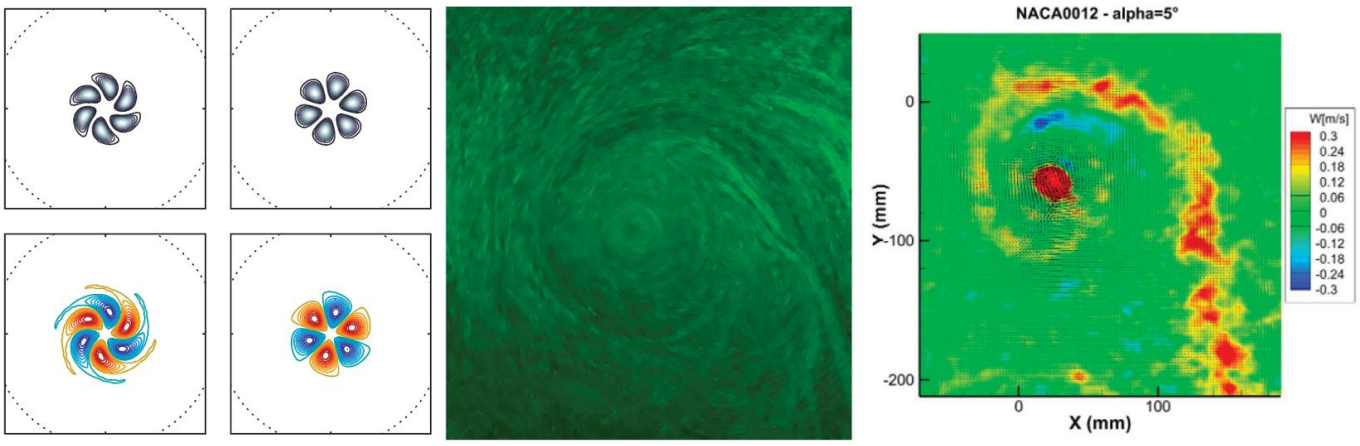


Figure 1: À droite : perturbation optimale avec un nombre d'onde azimutal m = −3 pour un nombre d'Atwood de 0,2. L'énergie cinétique de perturbation est représentée en haut et la densité de perturbation en bas. Au centre : photographie du tourbillon d'extrémité d'aile d'un profil NACA0012 visualisé sur notre banc d'essai. À gauche : reconstruction du champ de vitesse correspondant par PIV résolue en temps.

MISSIONS :

L'objectif principal de ce projet postdoctoral est d'étudier expérimentalement l'effet de l'injection de jets à densité variable sur la dynamique, la stabilité et la durée de vie des tourbillons d'extrémité d'aile. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Concevoir, développer et caractériser un dispositif expérimental capable de générer un tourbillon d'extrémité d'aile contrôlé et d'injecter des jets à densité variable (par exemple, CO_2 ou hélium) dans son cœur.
- Effectuer des mesures PIV à haute résolution temporelle afin de capturer la réponse transitoire du tourbillon à des perturbations contrôlées.
- Quantifier les modifications des propriétés du tourbillon, notamment la circulation, la taille du cœur, la vitesse axiale et le taux de dissipation, dans différentes conditions d'écoulement et d'injection.
- Identifier et caractériser les mécanismes d'instabilité déclenchés ou amplifiés par les variations de densité au sein du cœur tourbillonnaire.
- Évaluer le potentiel de cette stratégie de contrôle pour réduire la durée de vie du tourbillon et, par extension, son impact sur la persistance des traînées de condensation.

PROFIL RECHERCHÉ :

Le candidat idéal sera titulaire d'un doctorat en mécanique des fluides, en aérodynamique ou dans un domaine étroitement connexe, avec une solide formation en mécanique des fluides expérimentale. Une expérience préalable des techniques de mesure optique, en particulier de la Vélocimétrie par Imagerie de Particules (PIV), est indispensable, et une familiarité avec les systèmes PIV à haute cadence ou résolus en temps sera considérée comme un atout majeur.

Le candidat devra démontrer :

- une connaissance approfondie en aérodynamique,
- une compétence en conception et réalisation d'essais aérodynamiques,
- de l'expérience dans le développement, la mise en œuvre et la caractérisation de dispositifs de contrôle d'écoulements,

- une maîtrise du traitement et de l'analyse de données, incluant des compétences en programmation (MATLAB, Python, etc...).

De solides compétences en rédaction scientifique et en communication en anglais sont requises. La capacité à travailler de manière autonome ainsi qu'en collaboration au sein d'un environnement de recherche interdisciplinaire est indispensable. Une expérience dans l'encadrement d'étudiants et dans la contribution à des projets de recherche collaboratifs sera considérée comme un avantage.

EXPÉRIENCE : Doctorat ou plus de 3 ans d'expérience en mécanique des fluides expérimentale

RÉMUNÉRATION : 3400€ / MOIS

DURÉE : 12 MOIS

RYTHME DE TRAVAIL : Temps plein

LIEU : TOULOUSE

RESPONSABLE DU SUJET :
NOM : NASTRO Gabriele
E-MAIL : gabriele.nastro@isae-supaero.fr

MODALITÉS DE CANDIDATURE : Les candidatures (CV et lettre de motivation) sont à adresser à gabriele.nastro@isae-supaero.fr

DATE LIMITE DE CANDIDATURE : 01/09/2026

RÉFÉRENCES :

[1] P. R. Spalart. Airplane trailing vortices. Annu. Rev. Fluid Mech, 30(1), 107–138 (1998).

[2] T. Gerz, F. Holzäpfel, and D. Darracq. Commercial aircraft wake vortices. Prog. Aerosp. Sci., 38(3):181–208, 2002.

[3] W. J. Devenport, R. A. Burley, and M. C. Rife. The structure and development of a wing-tip vortex. J. Fluid Mech., 312:67–106, 1996.

[4] L. Jacquin, D. Fabre, P. Geffroy, and E. Coustols. The properties of a transport aircraft wake in the extended near field: An experimental study. AIAA J., 39(9):1655–1665, 2001.

[5] D. Greenblatt and I. J. Wygnanski. The control of flow separation by periodic excitation. Prog. Aerosp. Sci., 36(7):487–545, 2000.

[6] J. D. Crouch, A. Garbaruk, and D. Magidov. Predicting the onset of flow unsteadiness based on global instability. J. Comput. Phys., 224(2):924–940, 2007.

[7] R. J. Adrian and J. Westerweel. Particle Image Velocimetry. Cambridge Univ. Press, 2011.

[8] J. Sablon, J. Fontane, G. Nastro and L. Joly. Transient growth mechanisms in variable-density vortices. Phys. Rev. Fluids, 11(1):014703, 2026.