



Impact du chargement alaire sur les propriétés et la dynamique des tourbillons de sillage, une analyse en bassin hydrodynamique
Impact of wing loading on the properties and dynamics of trailing vortices, a water towing tank analysis

Soutenance de thèse – Rolando CRUZ MARQUEZ

Jeudi 21 décembre 2023 à 14h00

En présentiel : Salle de réunion – Laboratoire de Mécanique de Fluides de Lille
Bâtiment M6, Villeneuve d'Ascq

En distanciel Jitsi (à utiliser avec le navigateur Chrome) :
https://rdv.onera.fr/these_rolando_cruz_soutenance

Devant le jury composé de :

- **Directeur de Thèse :**

* M. Patrick DUPONT (Maître de conférences HDR, Centrale Lille Institut) - Laboratoire de Mécanique des Fluides de Lille, Lille, France

- **Rapporteurs :**

* M. Ivan DELBENDE (Associate professor, Sorbonne Université) - Institut Jean le Rond d'Alembert, Paris, France

* M. Thomas LEWEKE (Directeur de recherche, IRPHE) - Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors-Equilibre, Marseille, France

- **Examinatrices / Examineurs :**

* Mme. Djeridi HENDA (Full professor LEGI) - Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels, Gières, France

* M. Laval JEAN-PHILLIPE (Directeur de recherche CNRS) - Laboratoire de Mécanique des Fluides de Lille, Lille, France

- **Encadrante :**

* Mme. Marie COULIOU (Ingénieure de recherche) - ONERA DAAA/AMES, Meudon, France

Invités :

* M. Vincent BRION (Responsable d'unité, Ingénieur de recherche) - ONERA DAAA/AMES, Meudon, France,

* M. Geoffrey TANGUY (Responsable d'unité, Ingénieur de recherche) - ONERA DAAA/ELV, Lille, France

--- 0 ---

Résumé / Abstract

L'impact de la charge alaire sur les propriétés et la dynamique des tourbillons marginaux est étudié dans des expériences en bassin hydrodynamique. Dans le cadre de la théorie de la ligne portante, la circulation locale Γ_y (avec y la coordonnée en envergure) dépend de la corde locale, de l'incidence effective et du coefficient de portance. Pour un avion commercial, la géométrie de l'aile varie en fonction de la phase du vol (par exemple, déploiement des dispositifs hyper-sustentateurs pour le décollage/l'atterrissage), modifiant ainsi Γ_y . Cela affecte les propriétés du sillage tourbillonnaire, issu de l'enroulement de la nappe tourbillonnaire initiale caractérisée par une intensité $-d\Gamma_y/dy$. Les grandes échelles de longueur impliquées dans le développement du sillage sont difficiles à traiter par un seul et même outil. Dans le présent travail, nous utilisons une expérience en bassin hydrodynamique pour explorer ce sujet sur une bonne portion du domaine d'intérêt.

Cette recherche est motivée par la préoccupation de longue date concernant le danger des tourbillons de sillage, un problème encore largement ouvert d'un point de vue technique et qui suscite une pression croissante dans l'industrie aéronautique, particulièrement aux abords des aéroports, du fait des contraintes induites par les règles de séparation et les difficultés à créer de nouvelles pistes ou de nouveaux aéroports. Cette pression résulte de l'augmentation continue du trafic aérien, malgré la préoccupation grandissante du rôle de l'aviation dans les problèmes sociétaux actuels (propagation des épidémies, impact climatique) qui auraient pu un temps laisser croire à une réduction de l'utilisation du transport aérien. La question centrale du point de vue de la mécanique des fluides est de savoir s'il est possible de réduire le danger des tourbillons par une conception intelligente de l'aile ou par des perturbations de forme passive qui modifient le sillage tourbillonnaire, réduisant ainsi les risques pour un avion suiveur.

Le travail présent considère initialement le cas de référence d'une aile rectangulaire, représentative du vol de croisière, puis varie la charge alaire avec des cas sélectionnés : une configuration hyper-sustentée, une configuration avec des perturbations sur le bord de fuite et des configurations qui génèrent quatre tourbillons, spécialement conçues pour une interaction accélérée des tourbillons. Le développement du sillage tourbillonnaire est étudié depuis le stade de l'enroulement jusqu'à 300 envergures en aval à un nombre de Reynolds basé sur la corde de $Re_c=10^5$. Des mesures Stéréo-PIV sont effectuées dans des sections du sillage généré par les ailes tractées afin d'évaluer les caractéristiques du tourbillon dans chaque situation. Le plan SPIV est fixe et le modèle se déplace dans le référentiel du laboratoire. Cela pose des difficultés pour suivre les tourbillons du sillage sur une longue période de leur évolution ainsi que pour décomposer l'écoulement en ses composants moyen et perturbateur. Un ensemble complet de procédures de post-traitement pour l'analyse des données SPIV et une stratégie spécifique pour la moyenne des données sont mises en œuvre.

Les résultats mettent en évidence la structure globale du sillage et le nombre de tourbillons marginaux par rapport à la charge alaire. Les propriétés essentielles des tourbillons (profil, rayon, circulation, écoulement axial et évolution temporelle associée) sont présentées et analysées pour en extraire un sens physique. Dans certains cas, nous sommes en mesure de mettre en évidence le développement de perturbations sur le tourbillon marginal formé dans le sillage lointain.

L'impact d'une ondulation de la forme du bord de fuite de l'aile est analysé. Cette modification est basée sur des résultats théoriques récents où le sillage tourbillonnaire est perturbé en agissant dans une région proche du bord de fuite. L'analyse montre que le tourbillon marginal est élargi par rapport au cas de référence, tout en conservant la même circulation. Cet élargissement du tourbillon réduit le risque pour un avion suiveur.

Pour une portance identique, les configurations hyper-sustentées qui génèrent des paires de tourbillons co-rotatifs dans le sillage proche présentent d'abord une fusion des tourbillons de même signe, puis un effet diffusif sur le noyau du tourbillon fusionné par rapport à la configuration de base. De plus, une augmentation de la circulation, jusqu'à 20 %, est observée en raison de la proximité plus grande des tourbillons.

En revanche, les configurations qui présentent des tourbillons contra-rotatifs de chaque côté du sillage montrent un processus de diffusion visqueuse qui entraîne une réduction de la circulation du tourbillon de bout d'aile.

Dans l'ensemble, le présent travail montre que la charge alaire a un impact important sur la position spécifique, la force et la taille des tourbillons dans le sillage.

--- 0 ---

The impact of wing loading on the properties and dynamics of trailing vortices is investigated in a water towing tank facility. In the framework of the lifting line theory, the local circulation Γ_y (with y the span-wise coordinate) depends on the local chord, effective incidence and lift coefficient. For a commercial aircraft, the wing geometry varies depending on the phase of flight (eg. deployment of high-lift devices for take-off/landing) which modifies Γ_y . This impacts the properties of the vortex wake, which originates from the roll-up of the initial vortex sheet characterized by strength $-d\Gamma_y/dy$. Given the substantial length-scales involved in modelling wake development to capture dynamically relevant timescales, numerical simulations remain a very costly solution to capture the dynamics of trailing vortices. Therefore in the present work we use a towing tank experiment to explore this topic.

This research is motivated by the longstanding concern of wake vortex hazard, an issue that remains

unresolved and that is the cause of increasing pressure in the aviation industry and at airports. This pressure continues to mount due to the continuous rise in air traffic, despite the rising concern of the role of aviation in societal problems (disease outbreaks, climate impact) which spell the idea of a reduced use of air travel. The central question from a fluid mechanics perspective is whether it is possible to reduce wake hazard through intelligent wing design or through passive shape perturbations that alter the vortex wake, consequently reducing the risks for a following aircraft. The present work initially considers a baseline case of a rectangular wing, which represents cruise-like flight, and then varies the wing-loading with selected cases: a high-lift loading configuration, a loading with trailing edge disturbances and loadings featuring multiple vortices, specifically designed for accelerated vortex interaction. The development of the vortex wake is investigated from the roll-up stage up to 300 spans downstream at a chord-based Reynolds number of $Re_c=10^5$.

SPIV measurements are made in sections of the wake generated by the towed wings in order to assess the vortex characteristics in each situation. The SPIV plane is fixed and the model is moving in the laboratory frame. This poses difficulties for tracking the wake vortices over a long period of their evolution as well as for decomposing the flow into its mean and disturbance components. A complete set of post-processing procedures for analysing the SPIV and a specific strategy for averaging the data is implemented.

The results highlight the overall wake structure and the number of trailing vortices relative to the wing loading. The essential properties of the vortices (profile, radius, circulation, axial flow and the associated temporal evolution) are presented and analysed to provide physical meaning. In some cases, we are able to expose the development of perturbations upon the trailing vortex formed in the far wake.

The impact of an undulation of the shape of the trailing edge of the wing is analysed. This modification is based on recent theoretical results where the perturbation of the vortex wake is achieved by acting in the trailing edge region. The analysis shows that the trailing vortex is enlarged compared to the baseline case, while keeping the same circulation.

Given identical lift, high-lift wing-load configurations that generate pairs of co-rotating vortices in the near wake exhibit first a fusion of the same-signed vortices and then a diffusive effect on the fused vortex core compared to the baseline configuration. Additionally, an increase in circulation, up to 20%, is observed due to the closer proximity of the vortices. On the other hand, wing-load configurations that feature counter-rotating vortices on each side of the wake exhibit a process of viscous diffusion that leads to a reduction of the circulation of the wing-tip vortex.

Overall, the present work shows that wing loading has an important impact on the specific position, strength and size of vortices in the wake.

--- 0 ---

Mots clés / Keywords

**TOURBILLONS DE SILLAGE - CHARGE AERODYNAMIQUE - STABILITE DES TOURBILLONS
TRAILING VORTICES – WING-LOAD – VORTEX STABILITY**