



Transition dans les bulbes de décollement laminaire sur des voilures fixes et tournantes à faible nombre de Reynolds

~

Transition in laminar separation bubbles on fixed and rotating wings at low Reynolds numbers

Soutenance de thèse (en Anglais) – Thomas JAROSLAWSKI

Lundi 6 février 2023 à 14h

Salle des thèses de l'ISAE-Supaéro

Devant le jury composé de :

- Taraneh SAYADI	Chargée de Recherche, Sorbonne Université	Rapportrice
- Jens FRANSSON	Professeur, KTH Royal Institute of Technology	Rapporteur
- Sandrine AUBRUN	Professeure, Ecole Centrale de Nantes, LHEEA	Examinatrice
- Ulrich RIST	Professeur, Universität Stuttgart	Examinateur
- Estelle PIOT	Directrice de Recherche, ONERA	Examinatrice
- Erwin GOWREE	Docteur, ISAE-Supaéro	Encadrant
- Jean-Marc MOSCHETTA	Professeur, ISAE-Supaéro	Directeur
- Maxime FORTE	Docteur, ONERA	Encadrant

Abstract

Modern micro aerial vehicles (MAVs) use fixed and rotary lifting surfaces, which operate at low Reynolds numbers resulting in the boundary layer being susceptible to separation and the formation of laminar separation bubbles (LSBs). In particular, LSBs, can be detrimental to the performance of the lifting surface and leave the flow in an unsteady and unstable configuration, where small changes in the freestream can cause a sudden onset of stall. MAVs operate in urban environments with high disturbances, such as freestream turbulence. Therefore, this thesis focuses on the transition mechanisms over fixed and rotary wings, focusing on the effects of freestream turbulence and roughness on the flow's instability. This thesis aims to further understand the physical mechanisms driving the transition process of the flow using a mix of experimental techniques such as hotwire anemometry (HWA) and infrared thermography (IRT), and linear stability analysis.

Experiments using infrared thermography and force measurements were conducted over rotors operating at low Reynolds numbers, with the feasibility of laminar to turbulent transition experiments over small rotors demonstrated. In the baseline hover configuration, a separated flow region, similar to an LSB, is observed over the suction side of the rotor aerofoil. Roughness at the leading edge of the suction side showed a two-fold effect on the aerodynamic performance, with the height of the roughness being a critical parameter. The performance increase was linked to a reduced separated flow region due to the earlier transition of the boundary layer. Moreover, when the rotor is in a climbing/advancing configuration, the presence of freestream turbulence also results in an increase in performance, which could be due to freestream turbulence promoting earlier transition and reducing the region of separated flow.

HWA is employed to study the flow development and transition of an LSB formed over the suction side of a two-dimensional aerofoil. The bubble is subjected to a wide range of freestream turbulence levels, and the coexistence of modal instability due to the LSB and non-modal instability caused by streaks generated by freestream turbulence was observed. The presence of turbulence-induced streaks resulted in mean flow modification, where an increase in turbulence intensity reduced the size of the LSB and dampened the disturbance

growth of the modal instability. The experimental data demonstrate that the streamwise growth of the disturbance energy is exponential for the lowest levels of freestream turbulence and gradually becomes algebraic as the level of freestream turbulence increases. Once a critical turbulence intensity is reached, there is enough energy in the boundary layer to suppress the LSB, resulting in the non-modal instability taking over the transition process. Furthermore, a follow-up complementary study, where streaks were generated via cylindrical roughness elements, shows the reduction of LSB size demonstrating the effectiveness of streaks as a flow control strategy for separated flows and the possible coexistence of modal and roughness induced non-modal instabilities.

Résumé

Les micro-véhicules aériens (MAV) modernes utilisent des surfaces portantes fixes et rotatives qui fonctionnent à de faibles nombres de Reynolds, ce qui favorise le décollement de la couche limite et la formation de bulbes de décollement laminaire (LSB). En particulier, ces bulbes peuvent nuire aux performances de la surface portante en créant une situation instationnaire et instable, où de petits changements dans l'écoulement en amont peuvent provoquer un décrochage brutal. Or, les MAVs opèrent usuellement dans des environnements urbains très perturbés à cause de la présence d'obstacles (bâtiments, arbres, etc.). Par conséquent, cette thèse se concentre sur les mécanismes de transition de la couche limite sur des ailes fixes et rotatives à faibles nombres de Reynolds, en mettant l'accent sur les effets de la turbulence extérieure et des rugosités de paroi sur les instabilités de l'écoulement. Cette thèse vise à mieux comprendre les mécanismes physiques qui régissent le processus de transition dans les bulbes en utilisant une combinaison de techniques expérimentales et également des analyses de stabilité linéaire.

En détail, une première expérience, utilisant la thermographie infrarouge et des mesures de force, a permis de montrer que ces techniques de mesure étaient pertinentes pour qualifier la topologie de l'écoulement et l'état de la couche limite sur les pales d'un petit rotor fonctionnant à faibles nombres de Reynolds. Dans la configuration de vol stationnaire, une région décollée similaire à un bulbe est observée sur le côté extrados des pales. D'autre part, cette expérience a montré l'influence que pouvait avoir le déclenchement de la transition de couche limite sur les performances aérodynamiques du rotor : celles-ci peuvent être améliorées si la transition est déclenchée au moyen de rugosités isolées d'une hauteur appropriées et placées proche du bord d'attaque car dans ce cas, la zone décollée s'en trouve réduite. A l'inverse, le déclenchement de la transition par des rugosités mal choisies peut détériorer les performances du rotor par un surcroît de traînée de frottement. Enfin, cette expérience a montré, lorsque le rotor est dans une configuration de vol en montée (ou avancée), que l'augmentation de la turbulence dans l'écoulement amont entraîne également une amélioration des performances du rotor, ce qui pourrait s'expliquer, de façon similaire, par un processus de transition plus précoce et une réduction de la zone décollée.

Une deuxième expérience a été mise en place sur un profil d'aile bidimensionnel fixe afin de mesurer plus précisément les instabilités qui se développent dans une couche limite décollée au moyen de l'anémométrie à fil chaud. Le bulbe qui se forme sur l'extrados du profil a été soumis à une large gamme de niveaux de turbulence en amont. Cette expérience a montré la coexistence d'instabilités modales dans le bulbe et d'instabilités non-modales générées par la turbulence extérieure. La présence de stries dans la couche limite en amont du bulbe, induites par ces forts niveaux de turbulence, entraîne une modification de l'écoulement moyen, où la réduction de la taille du bulbe entraîne une atténuation de la croissance de l'instabilité modale. Les mesures démontrent que la croissance de l'énergie dans la couche limite est exponentielle pour les niveaux les plus bas de turbulence extérieure et devient progressivement algébrique à mesure que ce niveau augmente. Au-delà d'un taux de turbulence critique, le bulbe disparaît même complètement et la transition de la couche limite n'est plus pilotée que par les instabilités non modales. Enfin, une étude complémentaire a été menée en utilisant le même dispositif expérimental mais en générant des stries au moyen de rugosités isolées placées en amont du bulbe. Cette expérience montre la réduction de la taille du bulbe et l'efficacité de stries artificiellement générée comme stratégie de contrôle pour les écoulements décollés.

Mots clés: Mécanique des fluides, stabilité, transition, bulbes de décollement laminaire