

Soutenance de thèse

Anaïs CHAMBON soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'ICA et intitulée «*Analyse aéroélastique expérimentale et analytico-numérique de pales de rotor flexibles*»

Le 25 septembre 2023 à 14h00, amphithéâtre 4 ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de

M. Guilhem MICHON	ISAE-SUPAERO	Directeur de thèse
M. Jacques-André ASTOLFI	IRENav	Rapporteur
M. Xavier AMANDOLESE	CNAM	Rapporteur
M. Olivier DOARÉ	ENSTA Paris	
M. Fabrice THOUVEREZ	École Centrale Lyon	
M. Christophe ELOY	École Centrale Marseille	Co-directeur de thèse
M. Sébastien PROTHIN	ISAE-SUPAERO	Co-encadrant de thèse
M. Leonardo SANCHES	ISAE-SUPAERO	Co-encadrant de thèse

Résumé : A ce jour, les applications faisant intervenir des rotors et des hélices sont de plus en plus nombreuses et variées. Un des principaux domaines concernés est le secteur de l'aéronautique. Pour améliorer les performances des aéronefs à rotors, la flexibilité est un facteur dimensionnant important, apportant légèreté, robustesse et fonctionnalités, mais favorisant également l'émergence d'instabilités aéroélastiques inhérentes à l'interaction entre la structure flexible et l'écoulement. Dans l'étude de pales flexibles en rotation, les propriétés structurales de la pale déterminent les principaux modes de flexion et de torsion. Pour certains régimes de fonctionnement, ces modes peuvent être excités et conduire à différents phénomènes d'instabilités tels que le flottement par coalescence de modes. L'une des causes de ce phénomène est la coalescence de ces deux modes structuraux : la flexion et la torsion, qui atteignent la même fréquence de vibration. Dans ce cas, la pale vibre de façon incontrôlable (régime instable) entraînant des dommages structurels pour la structure, de l'inconfort pour les passagers et une dégradation des performances en vol. Les motivations sont donc de comprendre et d'étudier ce phénomène afin de prévoir leur apparition et d'identifier les modes en jeu ou les paramètres ayant un impact important sur leur apparition. Il en est également de maîtriser ce phénomène en vu d'un éventuel contrôle, par le développement de technologies capables de modifier et de déplacer l'apparition de ces phénomènes, dans des régimes de vol moins contraignants. A cet effet, un banc d'essai expérimental dédié à l'étude des rotors à pales flexibles a été développé, afin de réaliser une analyse vibratoire et aérodynamique. Des jeux de pales de flexibilité et d'épaisseur variés ont été conçus avec différents matériaux composites, dans le but d'étudier l'influence de la flexibilité sur l'apparition des phénomènes aéroélastiques. Des mesures de performances aérodynamiques ainsi que des mesures de déformées dynamiques des pales en rotation ont été effectuées. Les mesures de déformées dynamiques des pales ont été faites à partir d'un système innovant de vibrométrie laser combiné à un système optique, un dérotateur, permettant de faire les mesures lorsque les pales sont en rotation. De plus, un modèle analytico-numérique aéroélastique est développé et est basé sur le couplage : - d'une approche par éléments finis pour modéliser le comportement dynamique des pales supposées comme une poutre uniforme, élancée, isotrope et homogène avec des déformations hors plan de flexion et de torsion, soumises à des forces inertielles et centrifuges dues aux effets de rotation. - De termes aérodynamiques quasi-stationnaires, définis à partir de la théorie instationnaire de Theodorsen. Enfin, des diagrammes de Campbell expérimentaux et numériques sont tracés pour étudier l'évolution et le comportement des modes propres en fonction de la vitesse de rotation du rotor. Ainsi la présence d'un couplage entre les fréquences de flexion et de torsion peut être détectée,

dans l'intervalle de vitesse de rotation opérationnelle du banc d'essai. Ces croisements entre modes de flexion et de torsion dans les diagrammes de Campbell peuvent être considérés comme un des indicateurs d'apparition du flottement par coalescence de modes et peuvent ainsi permettre d'identifier les vitesses de flottement des pales.

Mots clés : Aéroélasticité, Pales flexibles, Dynamique des structures, Vibrométrie laser, Dérotateur

Summary: In the case of a flexible blade, the structural properties of the blade determine the main modes of bending and twisting. For some operating points (i.e. for certain rotation speed and advance ratio), these modes may be excited and lead to flutter instability. In this case, the blade stalls uncontrollably and aerodynamic performance is severely degraded. This problem is general to rotors. However, it takes an even more significant scale in the context of passively adaptive blades (the blade is deformed under the centrifugal effect of rotation to operate at optimal effective incidence over a wide range of operating points). One of the consequences of these behaviors is the divergent aeroelastic flutter of the structure which can cause the destruction of the blade. The interest of understanding and controlling this phenomenon is therefore essential. The thesis work will consist of adopting a structured approach, starting from the analysis, understanding and modeling of the behavior of a flexible rotor blade for different operating points. Experimental and numerical means will be developed and used to assist in the analysis of these phenomena. A control strategy can be implemented in order to overcome these behaviors harmful to the performance of the rotors. On the methodological level, the approach will favor an experimental approach completed by numerical simulations by Navier-Stokes simulations type methods coupled with finite element methods. From an experimental point of view, the tests will be conducted jointly with the Clément Ader Institute (UMR CNRS 5312) and the Department of Mechanics of Structures and Materials at ISAE-Supaéro, on an existing rotor test bench. This test bench makes it possible to carry out global measurements (performances, efforts), local measurements embedded in the blades (network of accelerometers, pressure), as well as structural measurements of dynamic deformations by camera and rotary vibrometer. These measurements can thus be used to validate the computation results in strong coupling, but also as forcing in a weakly coupled computation. Modal analysis would allow us to determine the frequencies and deformations for the future control of the structure. The tests will be carried out on a rotor configuration at the fixed point (zero advance speed), but in a second step, a measurement campaign can be envisaged in the Aero-Acoustic Wind Tunnel of ISAE-Supaéro (SAA). Concerning the numerical point of view, the Department of Aerodynamics and Propulsion (DAEP) of ISAE-Supaéro, as well as the laboratory of the IRPHE of Marseille, develops codes of interaction fluid-structure, mixing calculations of the type Navier-Stokes for the fluid, at finite element resolutions for the dynamic part of the structure. The experimental databases will allow a validation of these calculations as well as a fine modeling of the phenomena. The challenge of this thesis will be to carry out experimental and numerical campaigns on controlled rigidity rotor configurations in order to achieve a thorough understanding of the phenomena involved as well as a model reduction intended both for the design of adaptive rotor blades and development of optimal control means.

Keywords: Aeroelasticity, flexible blades, Structural dynamics, scanning laser vibrometer, Derotator