

Soutenance de thèse

Xavier FLETE soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA EDyF et intitulée « *Instabilités aérodynamiques menant un bi-compresseur centrifuge muni de diffuseurs lisses au régime de pompage* »

Le 18 septembre 2024 à 10h00, Amphi 1 – ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de

M. Nicolas BINDER	ISAE-SUPAERO	Directeur de thèse
M. Yannick BOUSQUET	ISAE-SUPAERO	Co-directeur de thèse
M. Antoine DAZIN	Arts et Metiers ParisTech	Rapporteur
M. Jürg SCHIFFMANN	École Polytechnique Fédérale de Lausanne	Rapporteur
M. Gérard BOIS	Arts et Metiers ParisTech	Examineur
M. Pierre DUQUESNE	Ecole centrale Lyon	Examineur

Résumé : Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'une convention CIFRE entre Liebherr-Aerospace et le département d'aérodynamique, énergétique et propulsion de l'ISAE-SUPAERO (DAEP). Son but est d'identifier les phénomènes aérodynamiques responsables de l'entrée en régime de pompage d'un bi-compresseur centrifuge muni de diffuseurs lisses. Une attention particulière est portée sur les mécanismes de couplage inter-étages pouvant influencer la stabilité de la machine. L'objectif industriel est ici l'agrandissement de la plage de fonctionnement stable des compresseurs mono et bi-étagés. L'approche choisie pour mener cette étude est principalement numérique. Elle repose sur des simulations instationnaires réalisées sur la géométrie complète des configurations étudiées. Avant de s'intéresser au cas du bi-compresseur, une analyse du comportement à bas débits du premier étage est réalisée. Cette étude a révélé des changements majeurs des topologies d'écoulement pilotés par la réduction du débit. L'analyse de régimes transitoires a permis de comprendre les mécanismes à l'origine de ces modifications et en particulier du décrochage des roues et des diffuseurs. Une analyse de stabilité identifie deux phénomènes clés pour la stabilité de l'étage. Le premier est la recirculation se développant dans l'inducteur du rouet. Cette structure succédant au décrochage de l'entrée de roue se révèle stabilisante pour l'étage. Au contraire, le décrochage du diffuseur lisse apparaît être l'élément limitant pour la plage de fonctionnement à bas débit. L'influence de la vitesse de rotation est également discutée. Enfin, les mécanismes à l'origine des phénomènes d'intérêt sont étudiés afin de compléter les travaux existants. L'étape suivante consiste à identifier les effets d'interaction et d'intégration des étages dans le bi-compresseur. Dans un premier temps, le rôle de l'accord entre les étages dans la déstabilisation des bi-compresseurs est mis en évidence. Tous les scénarios de perte de stabilité sont envisagés. La conclusion est que, peu importe quel étage deviendra instable en premier, c'est toujours le déclenchement d'une instabilité de diffuseur lisse qui causera la déstabilisation du bi-compresseur. L'influence du composant assurant la jonction entre les étages est également analysée. Bien que la jonction d'origine n'affecte pas la stabilité globale, celle-ci dégrade considérablement les performances du second étage. Par ailleurs, sa forme particulière lui confère un effet tampon empêchant tout effet de couplage entre les étages. Pour cette raison, une configuration bi-étagée

munie d'un canal de retour aubé est également étudiée. La dernière partie de ce manuscrit restitue des outils et méthodes utilisables durant les phases de prédimensionnement pour prédire et repousser la ligne de pompage. Parmi ces outils, figure une méthodologie prédictive de la limite de stabilité à bas débit, basée sur un critère propre aux diffuseurs lisses. Enfin, des règles de conception permettant d'élargir la plage de chaque composant indépendamment sont présentées. La prise en compte des effets de couplage spécifiques aux bi-compresseurs a également conduit à l'élaboration d'une stratégie de répartition de la charge entre les étages permettant de maximiser la plage de fonctionnement.

Mots-clés : bi-compresseur centrifuge, diffuseurs lisses, couplage, pompage et décrochage, instabilités tournantes, conception

Summary: This thesis results from a CIFRE partnership between Liebherr-Aerospace and the Aerodynamics, Energetics and Propulsion Department of ISAE-SUPAERO (DAEP). It aims to identify flow phenomena involved in the surge inception of a two-stage centrifugal compressor with vaneless diffusers. Particular attention is paid to the coupling effects between both stages and the resulting impact on the compressor stability. The underlying industrial challenge is to extend the two-stage compressor's operating range. This study is mainly conducted through unsteady simulations performed on full-annulus domains.

Before focusing on the two-stage compressor case, the low-pressure stage behaviour at low mass flow rates is analysed. This in-depth flow field study brought to light a significant change in flow topologies driven by the mass flow rate reduction. The analysis of transient states has helped to understand the origins of these modifications, especially that of the impeller and diffuser stall. A first-order stability analysis identifies two key flow phenomena which drive the stage stability. The first is the inducer recirculation. This near-shroud flow structure following the impeller stall has a stabilising effect on the stage. On the contrary, the vaneless diffuser stall is the limiting factor for the operating range at low mass flow rates. The influence of the rotation rate is also discussed. Finally, the inception mechanisms related to the flow phenomena of interest are investigated to complement the literature works.

The next step is to identify the interaction and integration effects on both stages when integrated into the two-stage compressor. First, the role of stage matching in the two-stage compressor destabilisation is highlighted. All possible scenarios for loss of stability are examined. The conclusion is that it does not matter whether the low-pressure or high-pressure vaneless diffuser stalls first; such a component stall will cause the two-stage compressor to lose stability. The influence of the junction component is then analysed. Although the reference junction pipe does not affect the overall stability, it affects the performance of the stages. Furthermore, its particular shape makes it act as a buffer zone, preventing any coupling between both stages. Hence, an additional configuration with a vaned return channel is added to promote the stage coupling and generalise results from the reference compressor study.

The last part provides useful tools and methods intended to be used during preliminary design steps to predict and push back the surge line. Among them is a predictive methodology of the stability limit based on a stability criterion specific to the vaneless diffusers. Then, design rules are proposed to extend the operating range of each component at low mass flow rates. Finally, considering the coupling effects leads to a pressure ratio sharing strategy between both stages, which maximises the two-stage compressor's operating range.

Keywords: two-stage centrifugal compressor, vaneless diffusers, coupling effect, surge and stall, rotating instabilities, design