

Thèse de doctorat de Christophe Montsarrat

Résumé en français :

Modélisation des écoulements de jeu radial en compresseurs axiaux

La présente étude vise à étudier les écoulements de jeu en tête d'aube sur les rotors de compresseurs axiaux. Elle se concentre en particulier sur trois caractéristiques du tourbillon de jeu : la position du détachement du tourbillon sur l'extrados de la pale, sa trajectoire dans le canal inter-aubes et sa circulation, qui permet de quantifier son intensité. Leur prédiction est analysée à l'aide de deux niveaux de résolution numérique.

La première approche utilise une méthode haute-fidélité. La ZDES (Zonal Detached Eddy Simulation) est utilisée sur un rotor de compresseur haute-vitesse, sur lequel une campagne de mesures expérimentales a été menée. Les résultats moyennés en temps sont comparés avec une approche RANS stationnaire (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) et avec les données expérimentales. Malgré son coût de calcul important, l'approche ZDES est généralement mieux adaptée que le RANS pour traiter des écoulements secondaires comme les écoulements de jeu. Les résultats obtenus confirment le bénéfice d'utiliser la ZDES, qui prédit un tourbillon de jeu moins diffus qu'avec le RANS, et qui donne des résultats plus proches des mesures expérimentales. Une étude paramétrique est ensuite menée sur la taille de jeu avec la ZDES. Trois tailles de jeux sont testées. L'analyse moyennée en temps confirme les résultats de la littérature sur la position du point de détachement. Elle indique aussi que la trajectoire moyenne du tourbillon de jeu peut être prédite par un modèle à partir de la charge à mi-envergure. Enfin, l'augmentation de la circulation avec la taille de jeu est observée, avec un tourbillon dont le coeur est plus large et des niveaux de vorticités axiales plus importants. L'analyse instationnaire se concentre sur l'apparition d'un éclatement tourbillonnaire dans le passage, uniquement observé pour le plus grand jeu. L'analyse fréquentielle sur la vitesse axiale dans le coeur du tourbillon permet d'identifier des fluctuations basse fréquence qui pourraient correspondre à une oscillation du tourbillon de jeu.

La seconde approche s'intéresse aux capacités d'une méthode potentielle, méthode basse fidélité, appliquée aux écoulements de jeu. La méthode des panneaux tourbillonnaires (VLM) utilise une distribution de singularités tourbillonnaires pour reproduire l'objet aérodynamique, dont la présence induit une perturbation du champ de vitesses. Cette approche, peu coûteuse en calcul, est destinée aux étapes de pré-dimensionnement quand une grande variété de géométries doit être évaluée. Après une validation sur des cas classiques d'aérodynamique externe, la méthode est testée sur une configuration expérimentale s'intéressant aux écoulements de jeu. Cette configuration comprend une aube fixe en porte-à-faux avec une paroi fixe, dont la distance entre les deux (le jeu) peut être modifiée. Un nouveau modèle de prédiction de la circulation du tourbillon de jeu est construit et renseigné à partir des résultats apportés par la VLM. En considérant le mélange de paires de tourbillons contra-rotatifs, suivant un modèle analytique visqueux, l'augmentation de la circulation avec le jeu obtenue expérimentalement est bien reproduite sur une large gamme de jeux testés. Toutefois, des développements restent à faire afin de pouvoir appliquer la méthode potentielle et le modèle de diffusion à un rotor de compresseur.

Mots-clés : Compresseur axial, Écoulements de jeu, Tourbillon de jeu, Vorticités, Circulation, Zonal-Detached Eddy Simulation (ZDES), Méthode des panneaux, Vortex Lattice Method (VLM), Modélisation

Abstract:

Tip-leakage flow modelling in axial compressors

The present thesis aims at investigating tip-leakage flow (TLF) in axial compressors with the help of two resolution levels. The study particularly focuses on three characteristics of the tip-leakage vortex (TLV) found in the tip region of compressor rotors: the location of where the TLV detaches from the blade, its trajectory in the blade passage and its circulation, quantifying its intensity. Their prediction is analyzed with both resolutions.

Zonal Detached Eddy Simulations (ZDES) are used on a rotor of an experimental high-speed compressor. The results are compared to a steady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) simulation, less costly but also generally poorly adapted to this kind of flows. The results show the benefits of the ZDES approach compared to RANS, especially in the treatment of the TLV. With ZDES, the TLV diffuses less and is found to be a more persistent structure along the chord. A parametric study on the tip gap size is then led with the ZDES. Three values of the tip gap are tested. The time-averaged analysis confirms results from the literature on the position of the detachment point. It also indicates that the mean trajectory of the TLV could be predicted by a model, based on the knowledge of the midspan loading. Finally, it puts forward the increase of circulation with the tip gap size, with a larger TLV core and higher levels of axial vorticity. The unsteady analysis focuses on the occurrence of a vortex breakdown, only observed with the largest tip gap size through a Q-criterion and contours of axial vorticity. A frequency analysis on the axial velocity in the TLV core enables to identify a low-frequency phenomenon on the largest gap, could be associated to a vortex wandering.

The second approach investigates the capabilities of a potential method, a low-resolution method, applied to tip-leakage flow. The Vortex Lattice Method (VLM) relies on the use of vortex singularities to replicate the presence of an aerodynamic body, which induces a perturbation on the velocity field. This approach is computationally cheap and is dedicated to preliminary design, when a large quantity of geometries have to be evaluated. After a validation on external aerodynamics cases, the method has been tested on a TLF configuration, consisting of a single blade interacting with a casing endwall, where the tip gap size can be varied. A new model for the prediction of the TLV circulation is constructed, using the results of the VLM as inputs. By considering the mixing of pairs of contra-rotative viscous analytical vortices, the experimental increase of the circulation with the gap can be well captured by the VLM model over a large range of tip gaps. However, further work is needed to improve the module in order to be used on a compressor geometry.

Keywords: Axial compressor, Tip-leakage flow (TLF), Tip-leakage vortex (TLV), Vorticity, Circulation, Zonal-Detached Eddy Simulation (ZDES), Vortex Lattice Method (VLM), Modelling