

DISS. ETH NO. 21994

Investigation of the heat transfer patterns on the vane endwall of an axial turbine

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Benoit Edouard LAVEAU

Master of Science - Aeronautical Engineering
ISAE - Ensica, Toulouse, France

born on November 28, 1985
citizen of France

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Reza S. Abhari, examiner
Prof. Dr. Michael Crawford, co-examiner

2014

Abstract

In order to continue increasing the efficiency of gas turbines, an important effort is made on the thermal management of the turbine stage. In particular understanding and accurately estimating the thermal loads in a vane passage is of primary interest to engine designers looking to optimize the cooling requirements and ensure the integrity of the components. The latest development in turbine aerodynamics, driven by the improvement of numerical predictions technique, have achieved a reduction of aerodynamic losses by using non-axisymmetric modification of the endwall shape. The modification of flow structure due to the contouring has been covered intensively in the last decade but the consequence on the thermal loads distribution are not yet fully understood. This study focuses on the measurement of heat transfer on cylindrical and contoured endwall in a vane passage with advanced 3D airfoils in an axial turbine steady state facility.

In a preliminary phase, the experimental methods and procedure are adapted or improved to provide high resolution and high accuracy heat transfer data on the endwall of a vane passage. The work is performed in a test bench facility LAVAL, equipped with a thermally managed flat plate. A linear cascade composed of NACA symmetric airfoils is installed in the test section and provide a configuration similar to the turbine configuration. The measurements are performed using an infrared camera traversed by a multi-axis traversing system accessing the surface through Zinc Selenide windows. The measurement technique is based on a quasi-isothermal boundary condition obtained with circulating water impinging on a thick copper plate covered with an insulating Kapton layer. The adiabatic wall temperature and the heat transfer coefficient, are deduced from multiple measurements performed at different solid temperature. The small aspect ratio of the channel requires multiple position and access for the camera to cover the complete passage. The geometrical calibration of the camera allow the reconstruction of the complete passage. The measurements are performed on two endwall configurations, flat and contoured, at different flow conditions providing a variation of Reynolds number of 38%. A numerical study helps clarifying the link between the change in the heat transfer quantities and in the flow field due to the endwall contouring. Finally predicted heat transfer data are compared to the experimental data and the significant difference in the measured heat transfer coefficient between flat and contoured endwalls, is under-predicted numerically.

A heat transfer platform composed of four vanes is designed, assembled and integrated to the axial turbine facility. The heat transfer measurement technique is adapted from the flat plate configuration, and uses circulating water in multiple channels drilled through the aluminum core part of the platform. The mechanical and thermal design

are optimized using 3D numerical tools (CAD, CFD, FEM). A distribution system is designed and used to individually feed and control the flow through the different channels. The accessibility of the passage endwall is granted through small Zinc Selenide windows designed using ray tracing scripts and tested on a bench. Due to the limited size of the view ports, a 6 axis robot arm provides an automatic traversing of the camera.

Experimental measurements of heat transfer quantities are performed on the cylindrical endwall of the nozzle guide vane passage in the turbine facility. The heat transfer quantities are derived from measurements at 14 different isothermal temperature accomplished in a single measurement day. Two different flow conditions obtained by varying the mass flow through the turbine: measurements at the design point ($Re_{C_{ax}}=700k$ and at a reduced mass flow rate ($Re_{C_{ax}}=520k$). The repeatability of the measurements is shown to be better than $\pm 5\%$. The comparison of the measured data to flat plate correlation shows matching values obtained in the inlet portion of the segment where the flow acceleration and the impact of secondary flow structures are limited. The experimental data are supplemented with numerical predictions that are deduced from a set of adiabatic and diabatic simulations. In addition, the predicted flow field in the passage is used to highlight the link between the heat transfer patterns measured and the vortical structures present in the passage. Comparison of predicted and measured data along streamlines highlight the difficulty for CFD codes to predict the heat transfer coefficient levels.

The surface properties of the measurements platform are measured and quantified in terms of roughness. A high resolution 3D scan of the surface is also performed to provide an equivalent sand-grain roughness based on the elements distribution, which is used for numerical simulations. A roughness model is implemented in the in-house code Multi3 and the comparison of aerodynamic losses and heat transfer between smooth and rough surfaces are performed.

In a second measurement campaign, a turbine geometry with contoured endwall is integrated to the facility. The measurements of heat transfer quantities are performed on the contoured endwall for the same operating conditions as the cylindrical case. The extreme curvature encountered on the endwall prevented an ideal attachment of the Kapton layer and micro air bubble of the order of $50\mu m$ thickness have been trapped underneath. The affected regions have been identified and an experimental procedure is developed to quantify the change in the local thermal resistance due to the presence of air. The calibration procedure helped to recover the data in regions covered with the micro bubbles. The data from the contoured endwall are compared finally to the cylindrical case. Numerical predictions performed with the in-house code Multi3 provides more insight into the flowfield modification due to the endwall contouring. The change in the horseshoe vortex behavior is highlighted as well as the change in wall shear stress distribution in the downstream part of the passage.

Résumé

Afin de poursuivre l'amélioration de l'efficacité des turbines à gaz, les efforts de recherche se concentrent principalement sur la gestion des échanges de chaleur dans l'étage de turbine. En effet, l'augmentation de la température à la sortie de la chambre de combustion est la voie privilégiée aujourd'hui pour accomplir cette tâche. La compréhension des phénomènes physiques gérant les transferts thermiques et leur estimation est essentielle pour les ingénieurs définissant les composants et flux d'air requis pour protéger et refroidir les pièces et s'assurer du maintien de leur intégrité mécanique tout au long de leur utilisation. D'un point de vue aérodynamique, l'amélioration des techniques de simulation numérique a permis de réduire les pertes grâce à l'utilisation de formes non-axisymétrique pour les carter d'aubes de turbine. Les changements introduits par ces modifications sur le flux d'air ont été étudié de façon intensive dans la dernière décennie. En revanche l'impact de ces modifications sur les échanges thermiques reste méconnu. Cette étude concerne donc la mesure des échanges thermiques dans un passage d'aube de turbine ayant une géométrie complexe tri-dimensionnelle et équipée de carter cylindrique ou tri-dimensionnels. Dans une première partie, les méthodes expérimentales et les procédures de mesures sont adaptées et améliorées afin d'obtenir des mesures à haute résolution avec une précision accrue. Ce travail est effectué dans une soufflerie à section rectangulaire équipée, dans la section de test, d'une plaque plane contrôlée thermiquement. Trois profils symétrique sont installés dans la section de test afin de simuler une configuration aube-carter similaire à ce qui se trouve dans une turbine. Les mesures expérimentales sont effectuées par thermographie infrarouge à travers un accès optique fait en cristal de Zinc Selenium. La technique de mesure employée utilise une plaque de cuivre contrôlée thermiquement par circulation d'eau et recouverte d'une structure isolante à base de Kapton, fournissant ainsi une condition aux limites quasi-isotherme. La température adiabatique de surface et le coefficient d'échange de chaleur sont obtenus grâce à plusieurs mesures à des températures de plaque différentes. La forme étirée de la section de test requiert l'utilisation de multiples positions et accès pour la caméra infrarouge. Les données acquises sur l'ensemble du passage sont reconstruites grâce à une calibration géométrique du système. Deux configuration de carters sont également utilisées, avec des surfaces planes et tri-dimensionnelles. Les mesures sont effectuées pour deux conditions d'opérations, permettant une variation du nombre de Reynolds de l'ordre de 38%. Une étude numérique fournit le lien entre les changements de transferts de chaleur mesurés et les changement d'écoulement du flux d'air. Enfin les échanges de chaleur sont également prédits numériquement et comparés aux données expérimentales. La principale différence réside dans la sous estimation des échanges de chaleur prédite.

Dans une seconde phase, une plate-forme de mesures composée de quatre aubes de distributeur est conçue pour permettre les mesures de transfert thermique dans la turbine axiale LISA. La méthode de mesure, utilisée dans la configuration plaque plane, est adaptée et utilise également la circulation d'eau à travers plusieurs canaux dans le segment fabriqué en aluminium. La conception mécanique et thermique est réalisée grâce à des outils numériques de CAD, CFD et FEM, en trois dimensions. La circulation d'eau à travers chaque canal est contrôlée grâce à un système de distribution. L'accès optique pour la caméra infrarouge est obtenu à travers multiples éléments en Zinc Selenium. Un robot six axes est utilisé pour manipuler la caméra et offrir une couverture complète du passage entre deux aubes de distributeurs. Les mesures expérimentales sont ensuite effectuées sur le moyeu du distributeur dans la turbine axiale LISA. Les coefficients d'échanges thermiques sont obtenus grâce à l'utilisation de quatorze températures de solide, obtenus au cours d'une unique journée de mesure. Les tests sont effectués pour deux conditions (nominales avec $Re_{Cax} = 700k$ et réduite $Re_{Cax} = 520k$) de fonctionnement obtenues en variant le flux d'air à travers la section de test. Un test de répétabilité des mesures montre des différences inférieures à $\pm 5\%$. Les coefficients d'échange de chaleur mesurés à l'entrée du passage, où les structures secondaires sont limitées, sont en accord avec les corrélations pour plaque plane. Des simulations numériques sont également utilisées pour identifier les liens entre les variations d'échanges thermiques dans le passage et les spécificités d'écoulement du flux d'air. La comparaison des données le long des lignes d'écoulement montre la difficulté des simulations numériques à prédire les coefficients d'échanges thermiques. La rugosité de la surface de la plate-forme de mesures est mesurée avec un profilomètre et un système de mesure optique permettant d'obtenir des données tri-dimensionnelles à haute résolution. La réduction des données obtenues permet d'obtenir une rugosité équivalente de type "grain de sable" qui est utilisée dans les modèles numériques. Un modèle de rugosité est ajouté au code numérique Multi3 et utilise la mesure de rugosité pour prédire les pertes aérodynamiques et les échanges de chaleur dans le distributeur. Enfin, une géométrie de moyeu non-axisymétrique est installée et testée dans la turbine. Les mesures d'échanges de chaleur sont effectuées sur les parois tri-dimensionnelles, dans les mêmes conditions de fonctionnement que les mesures sur parois cylindriques. L'installation de la couche isolante de Kapton est rendue délicate par la courbure des surfaces du moyeu et des micro bulles d'air, de l'ordre de $50\mu m$ sont présentes sous la couche, ce qui altère les mesures. Afin de corriger les données mesurées dans les régions affectées par ces bulles d'air, une procédure de calibration utilisant la réponse transitoire en température de la surface à une impulsion d'un laser est développée. Les données recouvrées sur les surfaces complexes sont ensuite comparées aux données mesurées dans la configuration à parois cylindriques. Le code Multi3 est utilisé à nouveau et fournit des indications sur la modification des écoulements des flux d'air due à la déformation des parois. En particulier, des changements de comportement du vortex de bord d'attaque sont observés ainsi que les variations de coefficient de friction de paroi dans la seconde partie du passage.