

Diss. ETH No. 18087

**A 48kHz Bandwidth, 1.8mm Diameter Entropy Probe  
for Aerothermal Loss Measurements in  
Turbomachinery Flows**

*A dissertation submitted to the*  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

*For the degree of*  
Doctor of Technical Sciences

*Presented by*  
MICHEL MANSOUR  
Dipl.-Ing Mec. EPFL  
Born 29.08.1975  
Citizen of Lausanne (VD)

*Accepted on the recommendation of*  
Prof. Dr. R. S. Abhari, examiner  
Prof. Dr. H.-M. Prasser, co-examiner  
Dr. A. I. Kalfas, co-examiner

2009

## ABSTRACT

The primary goal in the design of turbomachines is to reach higher efficiencies and wider operating ranges. Thus, a substantial effort has been made to understand the aerothermal loss mechanisms and their origins in the highly unsteady environment of turbomachines. A rational measure of loss can be provided from the standpoint of entropy. Therefore, the objective of the thesis is to develop and to demonstrate a fast-response entropy probe (FENT) that is of smaller dimension and larger bandwidth than the previous approaches. Entropy can be inferred from pressure and temperature measurements. In this new fast-response entropy probe, the measurement of unsteady temperature employs the use of heat transfer gages, and the measurement of the unsteady pressure is based on the fast-response aerodynamic probe (FRAP) technology that has been developed over the past years at the Laboratory of Turbomachinery at ETH Zürich.

The first task of this thesis consists in the development and in the integration of a heat transfer gages sensor. The basic element of the heat transfer gages sensor is a pair of thin film gages. The thin film gages are fabricated by sputtering 200nm thick nickel in a serpentine shaped onto a 1.8mm semi-cylindrical quartz substrate. This design provides high spatial resolution, high temperature sensitivity and robustness, which ensure that the unsteady total temperature measurement capability is in the same range as that of the unsteady total pressure. The thin film gages do not require an extensive calibration procedure, as a static calibration is used to derive the thin film resistance-temperature relationship for the thin film gages that are operated as resistance thermometers. An unsteady, semi-infinite, heat conduction model is used to correct for the unsteady heat losses to the substrate. The bandwidth of the model used in the present work is 400Hz to 120kHz with a phase shift of less than 5°. However the FRAP that is integral to the FENT probe limits the frequency bandwidth of the current FENT probe to 48 kHz and limits its maximum operating temperature to approximately 130°C.

The potential of the present fast-response entropy probe was demonstrated on three different test rigs.

The time-dependent relative entropy field at the impeller exit of a centrifugal compressor was measured. The measurements show that for operating condition A,  $\phi = 0.059$  and  $\psi = 0.478$ , the impeller exit flowfield is highly three-dimensional. Adjacent to the shroud there are high levels of relative entropy and at the mid-span there are low and moderate levels. Independent measurements made with a two-sensor fast-response aerodynamic probe (2S-

FRAP) show that the high velocity of the flow relative to the casing is responsible for the high relative entropy levels at the shroud. On the otherhand, at the mid-span, a loss free, jet flow region and a channel wake flow of moderate mixing characterize the flowfield. At both the shroud and mid-span, there are strong circumferential variations in the relative entropy. These circumferential variations are much reduced when the centrifugal compressor is operated at operating condition B,  $\phi = 0.0365$  and  $\psi = 0.54$ , near the onset of stall. In this condition the impeller exit flowfield is less highly skewed; however, the time-averaged relative entropy is higher than at operating condition A. The relative entropy measurements with the unsteady entropy probe are thus complementary to other measurements, and more clearly document the losses in the centrifugal compressor.

The simultaneous measurements of the pressure and temperature field of streamwise film cooling jet over a flat plate with  $30^\circ$  flow angle was performed in an experimental film-cooling facility. Turbine representative operating conditions and geometry are studied. The simultaneous measurement of time-resolved total temperature and pressure is combined to obtain the kinetic energy loss coefficient and the entropy change, as well as the streamwise baroclinic vorticity production term. The effect of unsteadiness on the aerothermal field, aerothermal losses and baroclinic vorticity is documented. Pulsation is seen to increase the aerothermal losses and baroclinic vorticity production compared to a steady jet.

An accurate assessment of unsteady interactions in turbines is required, so that this may be taken into account in the design of the turbine. This assessment is required since the efficiency of the turbine is directly related to the contribution of unsteady loss mechanisms. Therefore this thesis presents unsteady entropy measurements in an axial turbine. The measurements are conducted at the rotor exit of a one-and-1/2-stage, unshrouded turbine that is representative of a highly loaded, high-pressure stage of an aero-engine. The measurements of the time resolved entropy provide a new insight into the unsteady loss mechanisms that are associated with the unsteady interaction between rotor and stator blade rows. A particular attention is paid to the interaction effects of the stator wake interaction, the secondary flow interaction and the potential field interaction on the unsteady loss generation at the rotor exit. Furthermore, the impact on turbine design of quantifying the loss in terms of the entropy loss coefficient, rather than the more familiar pressure loss coefficient, is discussed in detail.

## RESUME

Un des buts primordiaux lors du développement de turbomachines est d'en améliorer le rendement tout en obtenant des plages d'opération plus étendues. Un effort substantiel a été investit dans la compréhension des mécanismes de pertes aérothermiques ayant lieu dans les écoulements hautement instationnaires des turbomachines. L'entropie permet une quantification rationnelle de ces pertes. Par conséquent l'objective de cette thèse est de développer une sonde rapide d'entropie nommée FENT (Fast-Response Entropy Probe), cette sonde devant être de plus petite dimension et de plus grande bande passante que les approches précédentes. L'entropie peut être inféré à partir de la mesure de pression et de température. Pour cette nouvelle sonde rapide d'entropie, la mesure instationnaire de température est accomplie à l'aide de jauges de flux de chaleur, alors que la pression instationnaire est mesurée à l'aide d'une sonde aérodynamique nommée FRAP (fast-response aerodynamic probe). La technologie des sondes aérodynamiques FRAP est basée sur le développement et l'expérience acquise lors des vingt dernières années au laboratoire de turbomachines à l'EPF Zürich.

La première tâche de cette thèse consiste en au développement et à l'intégration des jauges de flux de chaleurs. La composante primaire des capteurs de flux de chaleur est une paire de films minces. Les films minces consistent en des serpentins en nickel d'une épaisseur de 200nm, déposés par pulvérisation cathodique sur un substrat semi cylindrique en quartz de 1.8mm de diamètre. Cette conception permet d'obtenir une sonde robuste mesurant la température avec une haute résolution spatiale et temporelle. Ce capteur à films minces ne requiert pas de procédure de calibration approfondie car la température des films minces est mesurée à partir de leur variation de résistance ohmique. De ce fait seule la calibration statique la variation de résistance en fonction de la température est nécessaire. Un modèle de conduction semi-infini unidimensionnel est utilisé pour compenser les pertes de chaleurs instationnaires dû à la conduction à travers le substrat de quartz. Le modèle de conduction utilisé lors des mesures présentées a une bande passante comprise entre 400 Hz et 120 kHz et un déphasage de moins de 5°. Néanmoins la sonde aérodynamique faisant partie intégrante de la sonde rapide d'entropie limite les mesures à une bande passante de 48 kHz et à une température d'utilisation maximale de 130°C.

Le potentiel de la sonde rapide d'entropie a été démontré sur trois stands d'essais expérimentaux.

Des mesures temporelles du champ d'entropie relative ont été réalisées à la sortie d'un compresseur radial. Les mesures prises au régime de fonctionnement A,  $\varphi = 0.059$  and  $\psi = 0.478$ , montrent que l'écoulement à la sortie du compresseur est hautement tridimensionnel. Le niveau d'entropie proche du carter est élevé, alors qu'à mi-hauteur du passage l'écoulement atteint un niveau d'entropie moyen à élevé. Des mesures indépendantes prises à l'aide d'une sonde aérodynamique rapide comprenant deux capteurs de pression (2S-FRAP) montre que le niveau élevé d'entropie proche du carter est dû à la haute vitesse circumférentielle de l'écoulement. A mi-hauteur du passage l'écoulement se compose alternativement d'un écoulement en jet générant de faibles pertes et d'un écoulement de sillage générant des pertes modérées à fortes. L'écoulement se trouvant entre le carter et à mi-hauteur du passage est sujet à de forte fluctuation d'entropie dans la direction circumférentielle. Ces variations circumférentielles sont réduites quand le compresseur évolue à un régime B,  $\varphi = 0.0365$  and  $\psi = 0.54$ , proche de la limite de pompage. A ce régime de fonctionnement l'écoulement à la sortie du compresseur est plus uniforme, néanmoins le niveau moins d'entropie est plus élevé que pour le point de fonctionnement A. Les mesures d'entropie réalisées avec la nouvelle sonde rapide d'entropie sont ainsi complémentaires aux mesures du champ de vitesse tridimensionnel, et permettent une quantification quantitative des pertes à la sortie d'un compresseur radial.

La deuxième application présentée traite des mesures simultanées du champ de pression et de température d'un jet de refroidissement injecté selon la direction méridienne avec une inclinaison de  $30^\circ$  par rapport à la surface. Ces mesures ont été réalisées dans le stand expérimental de jet de refroidissement externe pour aube de turbine. La géométrie ainsi que les conditions d'écoulement étudié modélisent des conditions similaires à un étage haute pression d'une turbine axiale. Les mesures instationnaires de température et de pression sont combinées afin de dériver les coefficients de pertes d'énergie cinétique et d'entropie, de même que le terme de production de vorticité baroclinique selon la direction méridienne. Les mesures permettent de quantifier l'effet de la pulsation du jet sur grandeurs précédemment citées. De manière général les pulsations augmentent les pertes aérothermiques ainsi que la production de vorticité baroclinique.

Il est nécessaire de pouvoir déterminer précisément les interactions instationnaires entre les différents étages d'une turbine, afin de pouvoir en tenir compte lors de la conception aérodynamique. Car le rendement d'une turbine est directement influencé par ces sources

de pertes instationnaires. Par conséquent, cette thèse présente des mesures d'entropie instationnaire réalisées dans une turbine axiale modélisant un étage haute pression de turboréacteur. Les mesures ont été accomplies à la sortie du rotor sans couronne d'une turbine axiale comprenant 1 étage et demi. Les mesures d'entropie permettent une meilleure compréhension des mécanismes de pertes instationnaires due aux interactions entre les rangées d'aubes du rotor et des stators en amont et en aval. Une attention particulière a été apportée à la quantification des pertes instationnaires générées par l'interaction entre les écoulements secondaires et le champ potentiel du stator à la sortie du rotor. De plus l'impact de la quantification des pertes en termes d'entropie plutôt qu'en terme de perte de pression total relative est discuté en détail.