

Performance du refroidissement par film par les trous sœurs

¹Ben Ali Kouchih F., ²Grine M., ¹Nemdili F., ¹Azzi A.

¹Laboratoire Aéro-Hydrodynamique Navale, LAHN

²institute de maintenance et sécurité industriel

Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf d'Oran

benalikouchihfatima@gmail.com

Résumé — Cette étude numérique était performé pour évaluer l'efficacité de la technique des trous latéraux du refroidissement par film, en utilisant le code ANSYS CFX qui est basé sur la méthode des volumes finis pour la résolution des équations moyennes de Reynold (RNS). Cette conception d'anti-vortex consiste en deux trous secondaires de refroidissement à coté du trou principal de telle que l'injection secondaire détruit le vortex en forme de Rein (Kidney Vortices). Des configurations géométriques combinées avec différents taux d'injections ont été simulés pour évaluer l'applicabilité des trous latéraux dans des applications pratiques. Il a été trouvé que ces derniers améliorent la performance du refroidissement à travers tous le domaine de calcul. Les résultats numériques des trous équipés de la conception d'anti-vortex sont comparés avec le cas de base ou l'injection se fait à travers d'un seul trou rond.

Mots Clés: anti-vortex, refroidissement par film, volumes finis, Kidney Vortices, trous sœurs.

I. INTRODUCTION

Afin de réaliser plus de puissance et d'accroître davantage l'efficacité thermique de la turbine à gaz moderne, il est essentiel d'augmenter la température d'admission de la turbine. En moyenne, cette température est accrue continuellement par environ 20°C par année et peut atteindre environ 1700°C pour une turbine à gaz moderne. Ce progrès a été rendu possible notamment grâce aux efforts de recherche dans le domaine des matériaux et des alliages plus résistants aux hautes températures. Ainsi, la température de fonctionnement des aubes est passée de 1080°C à 1180°C. Parallèlement à ces améliorations, les techniques de refroidissement ont été introduites et ont évolué vers des systèmes plus complets et plus complexes d'une aube pleine et non refroidie, nous avons vu apparaître successivement des systèmes de convection interne forcée, des dispositifs de protection par film d'air, ou encore des méthodes de traitements de surface jouant le rôle de barrière thermique. De nombreux efforts ont été faits en vue d'optimiser ces différentes techniques. Le refroidissement par film d'air est la technique la plus couramment utilisée dans l'industrie. Dans une telle situation, l'air froid est fourni à partir du compresseur vers les aubes de la turbine. L'air froid est éjecté par des rangées de trous dans le passage de cascade et forme un film protecteur autour de l'aube. L'objectif majeur du refroidissement par film est de réduire le débit d'air réfrigérant tout en maintenant les pertes aérodynamiques minimales avec une protection thermique élevée. L'un des principaux défis de l'utilisation du refroidissement par film est la formation d'une paire de tourbillons qui élimine le jet de liquide de refroidissement au lieu de le laisser adhérer à la surface. Marc J.Ely et B.A.Jubran ont réalisé une étude

numérique pour évaluer l'efficacité de la nouvelle technique de refroidissement par film des trous secondaires anti-vortex. Deux trous de refroidissement secondaires lié au trou principal légèrement en aval de son point médian, Des taux d'injection de 0,2, 0,5, 1,0 et 1,5 ont été simulés pour évaluer l'applicabilité des trous latéraux dans des applications pratiques, ils ont trouvé que les trous latéraux amélioraient significativement la performance de refroidissement sur tout le domaine de calcul, en particulier à des taux d'injection élevés.

Azzi et Al ont ajouté une solution pour réduire l'effet des tourbillons contre-rotatif à des taux d'injections élevés, c'est l'utilisation du concept anti-vortex, ce dernier se compose d'un trou muni de deux trous branchés de manière que l'injection secondaire détruit les tourbillons du rein. L'avantage de ce concept est d'améliorer l'efficacité du refroidissement par film. Younggi Moon, Soon Sang Park ont analysé analytiquement l'effet de l'angle entre les trous de refroidissement par film primaires et auxiliaires sur l'efficacité de refroidissement par film. L'effet du taux d'injection et de l'intensité de la turbulence dominante a également été pris en considération.

Dans notre étude les résultats numériques des trous équipés avec le concept anti-vortex sont comparés à une injection d'un trou rond incliné de 35° (Sinha et Al), montrent une amélioration prometteuse dans tous les aspects thermiques. Un logiciel commercial, CFX, a été utilisé et le modèle de turbulence de K- ω SST a été choisi comme modèle de turbulence pour l'analyse. L'angle entre le trou primaire et le trou auxiliaire variait de 0 à 75 ° et le taux d'injection était compris entre 0,25 et 1,0. Les résultats ont montré que les trous de refroidissement du film anti-tourbillons se comportaient mieux que le trou cylindrique. En outre, l'efficacité de refroidissement par film pour les trous anti-vortex a été fortement affectée par l'angle entre les trous primaires et auxiliaires du trou de refroidissement par film anti-tourbillonnement.

L'efficacité du refroidissement par film est définie par:

$$\eta = (T_{\infty} - T_{aw}) / (T_{\infty} - T_c) \quad (1)$$

II. MODILISATION

A. Modèle de turbulence

Dans cette étude on a utilisé le modèle de turbulence k- ω SST. C'est un modèle qui combine les avantages de k- ω près de la paroi et ceux de k- ϵ loin du corps mais qui n'a pas la même notoriété que k- ω . Il joue un rôle important près de la paroi (intensification du transfert de chaleur) sous un gradient de pression défavorable, Il comporte également un terme supplémentaire de diffusion dans l'équation de transport de la dissipation pour que la prédiction dans les

zones transitoires soit bonne. La formulation de l'énergie cinétique et sa dissipation du modèle SST a une forme semblable au modèle (*Fluent*, 2003). La formulation du modèle de SST est comme suit:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho w u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) + G_w - Y_w \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (3)$$

Les diffusivités effectives du modèle $k\omega$ SST sont données par:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (4)$$

$$\Gamma_w = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_w} \quad (5)$$

Où σ_k et σ_w dénotent, respectivement, les nombres turbulents de Prandtl pour k et ω .

B. présentation du cas étudié

La configuration considérée consiste en une plaque plane munie d'un trou d'injection, de diamètre $D=12.7$ mm et d'un angle d'inclinaison de 35° , et d'une boîte de distribution (plenum). Les recherches de Sinha et Al (1991) était l'étude de référence pour le travail actuelle, on ajoutant deux trous anti-vortex d'un rapport de $D/d=0.5$, dont a varier la position. Le domaine est symétrique, seulement le demi -domaine est réalisé.

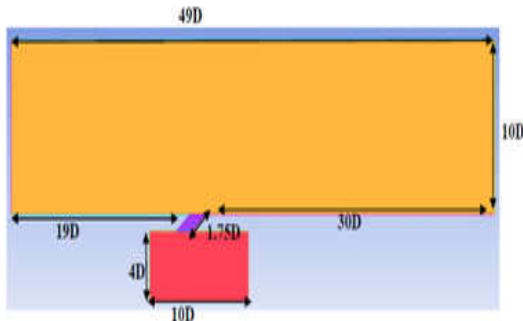


Fig.1. Dimensions de la géométrie

Le maillage effectué dans notre étude, est un maillage structuré de types hexaédrique, il est réalisé en créant des blocks ; ces blocks seront ensuite maillés dans une étape dite « pre-mesh » au La région au voisinage des trous d'injection est améliorée par l'adoption d'un maillage en O avec l'option (O-grid) est judicieusement raffiné et bien arrondi avec l'option (split edge). Ensuite le maillage final est chargé sur la géométrie à partir du bloc.

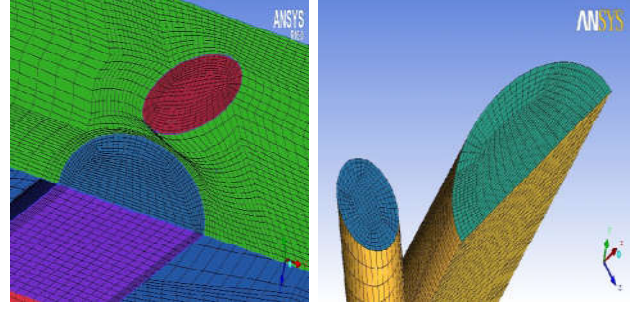


Fig.2. Maillage O-grid des trous latéraux

Des tests numériques préliminaires avec le taux d'injection moyen ($M=0.5$) ont permis de dégager une grille de calcul optimale vis à vis de la précision et des moyens de calcul disponibles. Les trois grilles testées, la grille adoptée comporte environ 1091898 d'éléments hexahedral distribué en 32 blocs distincts.

Maillage grossier	Maillage moyen	Maillage fin
523050	1091898	15021641

Tab.1. Dimensions des maillages des trois grilles testées

III. RESULTAT

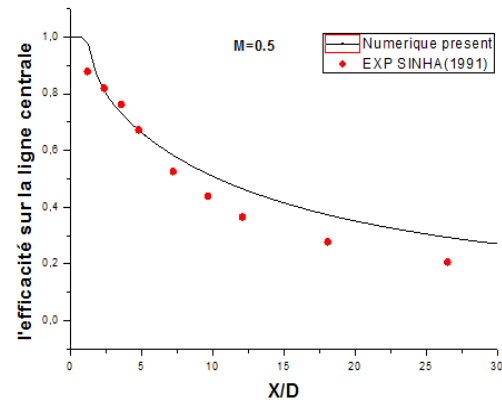


Fig.3. L'efficacité sur la ligne centrale

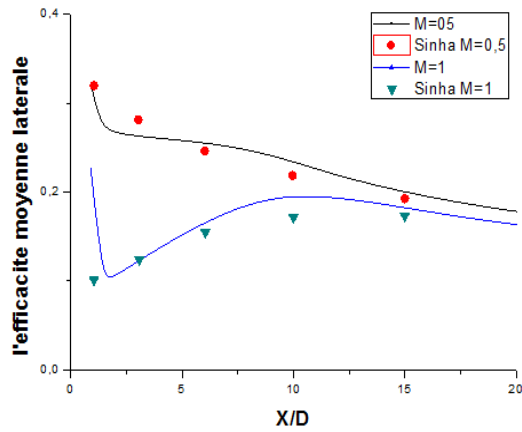


Fig.4. L'efficacité moyenne latérale

La figure 3 représente l'allure de l'efficacité sur la ligne centrale pour un taux d'injection $M=0.5$, l'efficacité présente une distribution décroissante traduisant le fait que le jet de refroidissement reste collé sur la plaque à refroidir. Il est clair que la validation est satisfaisante.

La figure 4 montre l'allure de l'efficacité latérale pour le cas de validation de Sinha [1]. Deux taux d'injections sont testés à savoir 0.5 et 1.0. Pour le cas du faible taux d'injection, l'efficacité présente une distribution décroissante traduisant le fait que le jet de refroidissement reste collé sur la plaque à refroidir. Pour le deuxième cas, relatif au taux d'injection élevé, l'efficacité est faible dans la zone proche du trou d'injection. Elle est croissante et rejoint celle du premier taux d'injection à partir d'une distance équivalente à 15 fois le diamètre du trou d'injection. Dans les deux cas, la validation est satisfaisante.

1er et 2eme cas: La figure 5 montre l'évolution longitudinale de l'efficacité moyenne latérale pour le premier cas, il est clair que l'efficacité diminue avec l'augmentation du taux d'injection qui augmente l'inertie du jet et provoque le décollement de celui-ci avec comme conséquence la détérioration de la protection thermique de la plaque. On remarque clairement que l'ajout des trous latéraux améliore la diffusion latérale du jet froid. La surface de la paroi est mieux protégée et l'efficacité est élevée.

2ème cas: Les mêmes remarques sont valables pour le 2ème cas avec une légère différence pour l'évolution longitudinale de l'efficacité latérale moyenne la supériorité du faible taux d'injection est valable jusqu'à la limite de $X/D=4$.

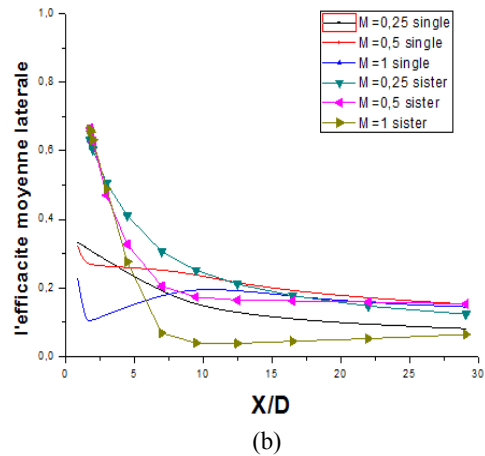
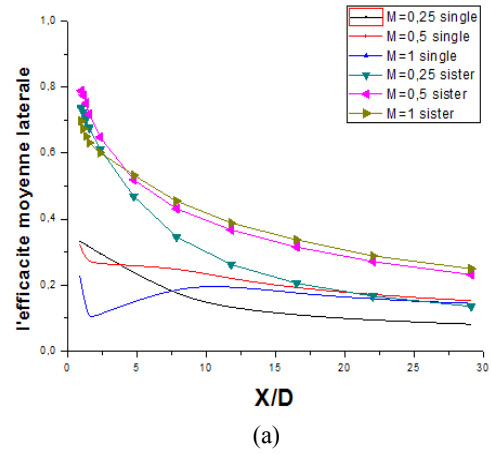
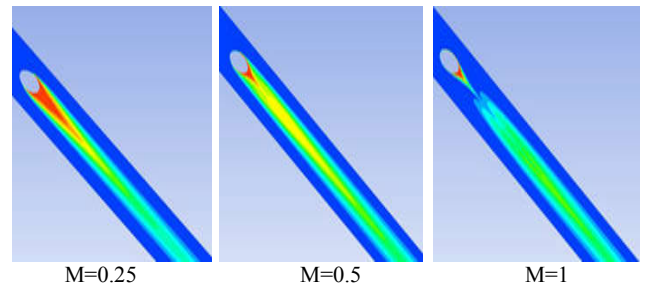
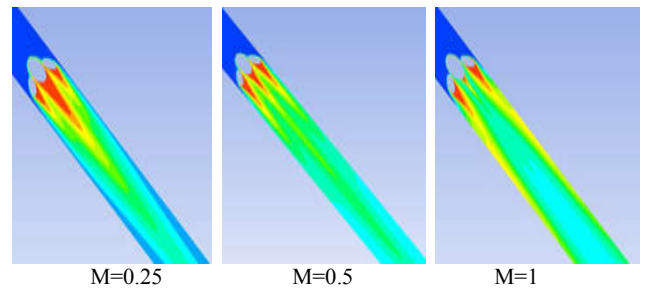


Fig.5. Comparaison pour différents taux d'injection, (a) 1er cas, (b) 2eme cas

Cas basique (sans trous latéraux)



1er cas



2eme cas

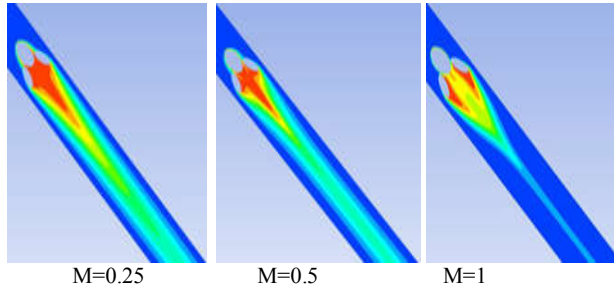


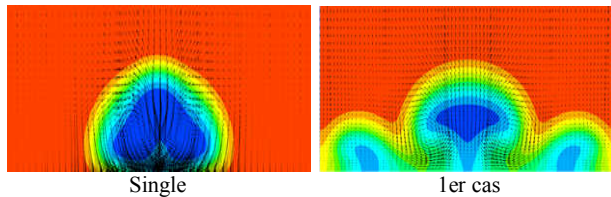
Fig.6. Distribution des contours d'efficacité

La figure 6 montre la distribution de l'efficacité de refroidissement sur la plaque ainsi que l'évolution longitudinale de l'efficacité moyennée, il est bien clair que l'efficacité augmente avec la présence des trous latéraux

D'après plusieurs études numériques, le taux d'injection optimal pour Sinha et al (1991) est $M=0.5$; ce faible taux d'injection améliore la diffusion du jet froid et mène à l'efficacité maximum moyenne latérale du refroidissement par film.

Parmi les inconvénients de refroidissement par film à travers les trous (principal, et secondaire), la discontinuité latérale du film, elle est bien claire dans les deux configurations en cas des taux d'injections élevés, ce résultat est en accord avec ceux obtenus par plusieurs chercheurs.

1er cas



2eme cas

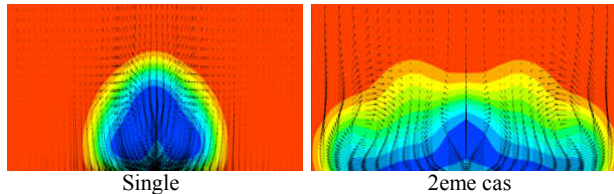


Fig.7. Vecteurs de vitesse superposés aux contours de température sur les plans perpendiculaires à la direction de l'écoulement principal ($X/D=3$).

La figure 7 représente des plans latéraux à la position 3D au delà du bord d'injection. La figure montre l'effet des trous latéraux sur la structure des tourbillons secondaires. Dans le cas de l'injection simple, la structure fait apparaître de vortex contrarotatifs ayant la forme d'un rein d'où l'appellation 'kidney Shape'. Ces deux vortex ont la particularité négative de ramener l'air chaud de l'écoulement principal et détruire ainsi la protection près de la paroi à refroidir. L'adoption des deux trous d'injection latéraux a pour objectif de détruire ces deux vortex et de ce fait améliorer la protection de la plaque. En examinant les plans de la figure7, il ressort que pour les 2

cas testés, l'efficacité de refroidissement est meilleure que dans le cas de l'injection simple. Ensuite tout dépend de l'angle appliqué pour les trous latéraux.

IV.CONCLUSION

Dans le cadre de cette étude une investigation numérique a été conduite pour évaluer l'influence des trous latéraux aux trous d'injection principale sur l'efficacité de refroidissement par film d'une aube de turbine à gaz . Pour chaque configuration géométrique trois taux d'injection ont été calculés pour une injection longitudinale et l'effet de ce paramètre très important a aussi été représenté par le tracé de l'évolution de l'efficacité moyenne latérale pour le cas avec dépôt et le cas référence sans dépôt. Pour les deux configurations géométriques avec/et sans dépôt il a été démontré que l'augmentation du taux d'injection détériore la protection de l'aube dans le sens où le jet refroidissant se décolle de la paroi et se dilue dans l'écoulement principal sans pour autant protéger la surface de l'aube.

Ce travail nous permet de conclure que les trous latéraux minimisaient efficacement la paire primaire de vortex en la contraignant avec la paire tourbillonnaire à contre-rotation (CRVP) en rotation opposée de part et d'autre. Cela a favorisé l'adhésion du flux sur l'ensemble du domaine, améliorant de manière significative les performances globales de cette technique de refroidissement. Il est proposé que les travaux futurs évaluent une étude paramétrique sur les géométries des trous latéraux afin de définir l'emplacement optimal de ces trous.

REFERENCES

- [1] Sinha, A.K, Bogard, D.G, Crawford, M.E, film cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio ASME paper 442/Vol.113 ,1991.
- [2] Marc J.Ely, Jubran, B.A, A numerical evaluation on the effect of sister holes on film cooling effectiveness and the surrounding flow field. Heat Mass Transfer 45:1435–1446,2009.
- [3] A.Azzi, B.A. Jubran, Numerical investigation of anti-vortex effects on film cooling effectiveness, 2nd International Conference on Energy Conversion and conservation,2010.
- [4] Younggi Moona, Soon Sang Parka, Jung Shin Parka, Jae Su Kwakb, Effect of Angle between the Primary and Auxiliary Holes of an Anti-vortex Film Cooling hole, Procedia Engineering 99 1492 – 1496,2015.