



Research Paper

Prédiction numérique de l'influence des imperfections sur l'efficacité du refroidissement par film

Numerical prediction of imperfections influence on the film cooling effectiveness

KHORSI Azzeddine^a, HAMEL Mohammed^{b,*}

^aLaboratoire de mécanique appliquée., Ecole Préparatoire en Sciences et Techniques · BP 64 CH2 Achaba Hanifi USTO31000 Oran, Algérie.

^bLaboratoire de mécanique appliquée, Faculté de génie mécanique, Université des sciences et de la technologie Mohamed-Boudiaf, El Mnaouar, BP 1505, Bir El Djir 31000, Oran, Algérie.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 December 16

Received in revised form 25 January 17

Accepted 07 February 17

Mots clés:

Refroidissement par film ;
imperfections; Modélisation ;
Efficacité

Keywords:

Film cooling; Imperfections;
Modelization; effectiveness

RÉSUMÉ

Le refroidissement par film est l'une des techniques les plus employées pour le refroidissement des aubes des turbines. Ce procédé est influencé par plusieurs paramètres géométriques et aérodynamiques. Un de ces paramètres est la forme géométrique des orifices d'injection : leurs formes et leurs arrangements...etc. Le présent papier présente l'influence des imperfections d'un orifice sur l'efficacité du refroidissement par film par le moyen d'un code de calcul ANSYS-CFX. L'effet d'un jet éjecté à travers un orifice parfait (sans imperfection) est utilisé comme référence. L'efficacité du refroidissement par film avec des imperfections au niveau de l'orifice d'injection est comparée à celle du cas parfait. Une forme demie torique joue le rôle d'une discrète imperfection. Les résultats sont présentés sous forme de graphes bidimensionnelles et des contours. Il est trouvé qu'une imperfection placée à un diamètre de l'amont du cylindre diminue l'efficacité pour des taux d'injection modérés. Sous les mêmes conditions, et pour la même imperfection fixée près de la sortie du cylindre l'efficacité s'améliore. Pour un taux d'injection de 1.5, l'efficacité devient meilleure que pour le cas parfait. Une imperfection placée plus loin de la sortie du cylindre n'a pas une influence signifiante sur l'efficacité du refroidissement.

ABSTRACT

Film cooling is one of the most used techniques for cooling turbine blades. This process is influenced by several geometric and aerodynamic parameters. One such parameter is the geometric shape of the injection holes: their forms and arrangements ... etc. This paper presents the influence of the hole imperfections on the effectiveness of film cooling by means of a computer code ANSYS-CFX. The effect of a jet ejected through a perfect orifice is used as a reference. The effectiveness of film cooling with imperfections in the injection hole is compared to the perfect case. A toric shape acts as a discrete imperfection. The results are presented as two-dimensional graphs and contours. It is found that an imperfection located at the upstream diameter of the cylinder decreases the effectiveness. Under the same conditions and for the same fixed imperfection near the exit of the cylinder the effectiveness improves. For an injection rate of 1.5, the effectiveness becomes better, than the perfect case. Imperfection placed further from the outlet of the cylinder does not have a significant influence on the cooling effectiveness.

* Corresponding author. Tel.: +213779550361.

E-mail address: mohammed.hamel@univ-usto.dz

1 Introduction

Le procédé du refroidissement par film dépend de plusieurs paramètres. Parmi les propriétés physiques qui influent sur le refroidissement par film : le rapport d'injection (blowing ratio), le rapport de quantités de mouvement, le rapport des pressions, le rapport des températures, le rapport des densités et le rapport des intensités turbulentes. Aussi les paramètres géométriques ont un impact sur l'efficacité de refroidissement par film. Par conséquent, la géométrie de l'aube et de l'orifice de l'écoulement refroidisseur, leur distribution et emplacement ont été largement étudiées. Guelailia et al. [1] ont publié une étude numérique du refroidissement par film à travers une géométrie console appliquée sur le bord d'attaque d'une aube de turbine de type VKI, leurs résultats ont montrés une nette amélioration de l'efficacité de refroidissement par film dans la zone du bord d'attaque et ce pour différents taux d'injection.

Récemment, Khorsi et al.[2] ont mené une étude numérique du refroidissement par film en présence d'un bloc déflecteur en forme de croissant installé à une distance de la sortie du trou d'injection, ils concluent qu'une nette amélioration de la distribution latérale de l'efficacité de refroidissement par film pourra être obtenue par un déflecteur placé sur la plaque à refroidir. Pour un écoulement dans une turbine à gaz typique le rapport des pressions varie entre 1.02 et 1.10 et le rapport d'injection correspondant prend des valeurs approximatives à 0.5 et 2.0 tandis que le rapport des températures est entre 0.5 et 0.85 ce qui correspond à un rapport des densités compris entre 2.0 et 1.5 [3].

Le refroidissement par film a été étudié sur des géométries réelles et d'autres simples avec un ou plusieurs orifices. L'expérimentation sur une turbine à gaz réelle est éprouvante et il est très difficile d'obtenir des résultats sous des conditions réelles de fonctionnement de la turbine. Pour cette raison il y a peu de résultats sur des aubes réelles tournantes. Dring et al. [4] étaient parmi les premiers à mesurer l'efficacité du refroidissement par film sur des aubes tournantes. Un grand nombre d'autres études était mené sous des conditions plus faciles et/ou sur des géométries simplifiées. Drost and Böls [5] ont étudié le transfert thermique sur une aube fixe avec un refroidissement par film. Ils ont trouvé que l'augmentation du rapport d'injection conduit à la diminution du refroidissement sur l'extrados de l'aube (suction) pour une seule rangée d'orifices et une amélioration du refroidissement pour un arrangement décalé des orifices de refroidissement. Sinha et al. [6] ont étudié l'influence du rapport de densités sur l'efficacité du refroidissement par film. Ils ont trouvé qu'une diminution du rapport des densités et une augmentation du rapport de quantités de mouvement réduisent l'efficacité latérale moyenne. Goldstein and Yoshida [7] ont examiné l'influence d'une laminaire /turbulente couche limite de l'écoulement principal sur un jet laminaire / turbulent à travers un tube cylindrique inclinées. Leurs mesures montrent qu'un jet turbulent donne plus d'efficacité de refroidissement qu'un jet laminaire et pour le même taux d'injection. Jovanovic et al. [8] ont mené une étude expérimentale de l'influence des imperfections au niveau du trou d'injection sur l'efficacité adiabatique du refroidissement par film. Ils ont ainsi analysé l'influence du rapport d'injection, l'intensité turbulente, la position et le nombre des imperfections sur l'efficacité du refroidissement par film. Ils ont modélisé l'imperfection par une forme demi-torique et ils déduisent que le rapport d'injection a une influence importante sur l'efficacité et que pour le cas parfait et les cas avec imperfection la meilleure efficacité est observée avec un taux d'injection d'environ 0.4. leur étude a montré aussi qu'une imperfection au voisinage de la sortie du trou a une influence minimale sur l'efficacité du refroidissement à un taux d'injection minimale et une maximale efficacité à un taux d'injection d'environ 0.7 ils ont conclu qu'une imperfection proche de la sortie du trou a un effet positif sur l'efficacité à partir d'un taux d'injection de 0.5. Leur expérience a montré aussi qu'une imperfection lointaine (à partir de 2.5D) n'a aucun effet sur l'efficacité du refroidissement par contre dans le cas intermédiaire là où l'imperfection est positionnée à environ 1.2D l'efficacité diminue sensiblement à partir d'un taux d'injection au-delà de 0.5.

Dans le présent travail, une étude numérique a été menée avec un code de calcul type CFD afin de pouvoir simuler l'impact des imperfections géométriques sur l'efficacité du refroidissement par film sur une plaque plane.

2 Description des cas étudiés

Le présent travail s'agit d'une étude numérique de l'influence des imperfections aux niveaux des trous d'injection sur l'efficacité du refroidissement par film. Pour cela on a adopté cinq configurations géométriques à savoir tube lisse, tube avec une seule imperfection modélisé par une forme annulaire en trois positions distinctes, et en fin un tube avec trois imperfections de la même forme. Les figures ci-après montrent les cas traités :

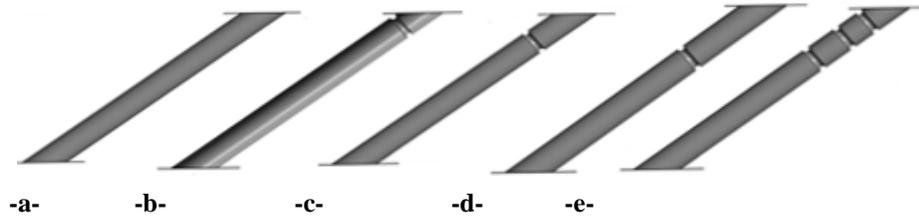


Fig. 1 – Configurations géométriques étudiées –a- : cylindre lisse (cas parfait) ; -b- : une imperfection à 0.2D ; -c- : imperfection à 1.2D ; -d- : imperfection à 2.5D ; -e- : trois imperfections

Le premier cas est un cylindre lisse qui ne présente aucune imperfection (Fig.1 a), c'est le cas idéal. Le deuxième cas (Fig.1b) est un cylindre avec une imperfection proche de la zone d'injection (à 20% du diamètre de tube), le cas (-c-) est une imperfection à 1.2D de la zone d'injection. Le cas (-d-) est une imperfection loin de la zone d'injection (à 2.5D).

La Fig.2 montre la disposition des imperfections sur le cylindre dont la longueur est de 10D. Le diamètre externe du cylindre est de 57mm et le diamètre interne de l'imperfection est de 42.8mm.

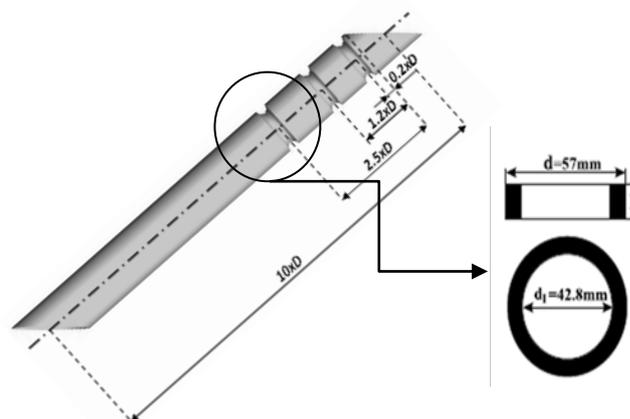


Fig. 2 – Disposition des trois imperfections.

3 Modélisation numérique

Les simulations numériques ont été réalisées avec le code de calcul ANSYS-CFX. Dans le module SOLVER du code, la solution des équations de conservations de la masse, de quantité de mouvement et de l'énergie est obtenue par l'application de la méthode des volumes finis avec un maillage de type hexaédriques.

La turbulence est modélisée par le modèle $k-\omega SST$ (shear stress transport) de Menter [9]. L'essentiel intérêt de ce modèle est sa capacité d'être employé dans les régions à fort nombre de Reynolds, tel que les zones proches de la paroi. Le modèle $k-\omega SST$ est basé sur l'utilisation du modèle $k-\omega$ de Wilcox [10] dans les régions proches aux parois, et le modèle $k-\epsilon$ dans les régions lointaines. Due à la bonne performance du modèle $k-\omega$ près de la paroi, le modèle $k-\omega SST$ n'a pas besoin d'un traitement explicite près de la paroi. Les détails du modèle de turbulence $k-\omega SST$ ne sont pas présentés ici puisqu'ils sont bien disponibles dans la littérature [9].

3.1 Domaine et conditions aux limites

Le domaine de calcul est présenté sur la Fig.3, il est composé de trois parties, la première représente le domaine de l'écoulement principal, la deuxième est le cylindre avec ou sans imperfections et une troisième partie qui est le plenum à travers lequel l'air froid est injecté.

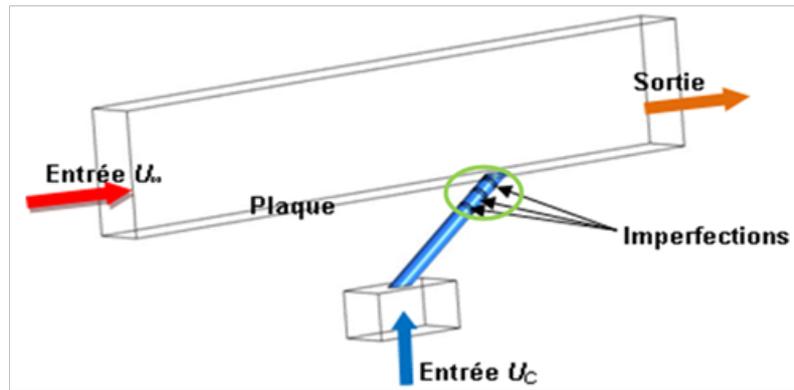


Fig. 3 – Domaine numérique et conditions aux limites.

Le débit du fluide refroidissant est quantifié à travers le taux d'injection défini par $M = \rho U_c / \rho U_\infty$ où l'indice (c) indique la masse volumique et la vitesse du jet froid et l'indice (∞) se rapporte aux conditions de l'écoulement principal. Conformément à l'étude expérimentale, trois taux d'injection sont testés. Les conditions aux limites appliquées dans la simulation numérique de l'influence des imperfections sont déduites de l'étude expérimentale de Milenko Jovanovi [8]. Le fluide utilisé dans cette étude est l'eau et la vitesse de l'écoulement principale est 0.2m/s avec une température de 20°C, tandis que la température du jet est de l'ordre de 26°C, ce qui donne un écart de température relativement faible. Trois taux d'injection ont été appliqués pour chaque cas à savoir 0.5, 1.0, et 1.5.

Sur les deux plans latéraux et le plan supérieur délimitant le domaine de calcul on applique une condition de symétrie et à la sortie du domaine une pression atmosphérique est appliquée.

3.2 Maillage

Le maillage employé est de type hexaédrique. Les grilles de calcul ont été réalisées par le logiciel ANSYS-ICEM, la Fig.4 donne un exemple de maillage utilisé dans l'étude de l'influence des imperfections sur l'efficacité adiabatique du refroidissement par film. Dans le tableau 1 on donne le nombre d'éléments des grilles de calcul pour chaque configuration.

Tableau 1 - Tailles des grilles utilisées

Cas	Nombre d'éléments
-a-	509817
-b-	610928
-c-	576884
-d-	590104
-e-	828001



Fig. 4 – Exemple du maillage d'un cylindre avec trois imperfections.

4 Résultats et discussions

4.1 Validation

La Fig.5, montre une comparaison entre les calculs numériques et les mesures expérimentales de l'efficacité adiabatique de refroidissement η (équation 1) sur la ligne centrale. La comparaison indique une bonne concordance entre la simulation numérique du présent travail et les mesures expérimentales en particulier ceux de Pederson [11]. Les résultats numériques présente aussi une surestimation de l'efficacité adiabatique sur la ligne centrale dans le cas parfaits par rapport aux mesures expérimentale de Mayhew [12] et Jovanovic [8].

$$\eta = \frac{T_C - T_P}{T_C - T_F} \quad (1)$$

Où T_C est la température du fluide chaud, T_F est la température du fluide froid et T_P est la température de la paroi.

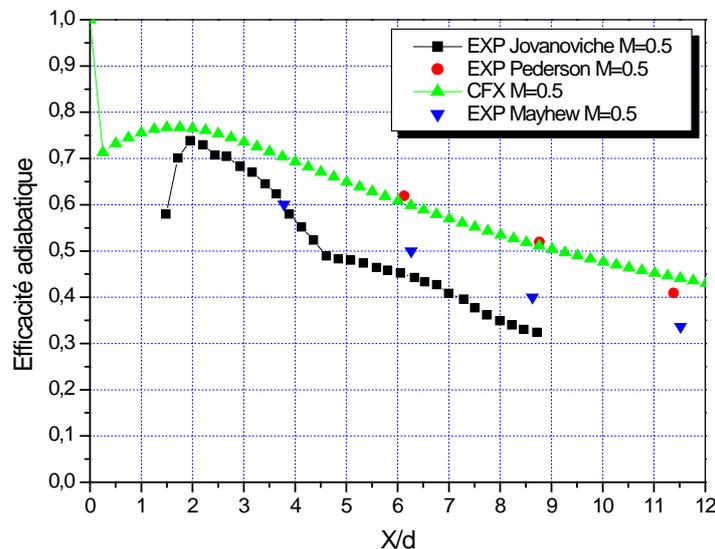


Fig. 5 – Efficacité adiabatique le long de ligne centrale dans le cas a.

4.2 Effet des imperfections

Pour étudier l'effet des imperfections sur l'efficacité adiabatique du film de refroidissement, on a changé la position du défaut modélisé par une forme circulaire torique à l'intérieur du cylindre.

L'efficacité adiabatique du film de refroidissement pour les différents cas est montrée sur la Fig.6. L'influence du défaut pour un rapport de vitesse de 0.5 est bien visible, dans le cas parfait (cas -a-) la surface refroidie ($\eta=0.1$) est bien étalée. À la fin de la plaque une efficacité de 0.32 est détectée la couverture latérale de cette efficacité est restreinte. La plus grande efficacité est détectée au voisinage du trou mais pas en amont.

Une imperfection proche de la sortie du trou (cas-b-), n'a pas une grande influence sur le champ de l'efficacité de refroidissement sur la plaque avec une petite amélioration de la distribution latérale de l'efficacité de refroidissement.

Pour une position un peu plus profonde de l'imperfection (cas-c-) on note une nette détérioration de l'efficacité de refroidissement et ceci dans les deux directions longitudinal et latérale.

Une imperfection loin de la zone d'injection n'a pas un impact important sur l'efficacité du refroidissement par film ceci est probablement due au ré-établissement de l'écoulement du jet dans le cylindre.

Si trois imperfections sont placées simultanément sur les trois positions (cas-e-), l'effet négatif du cas-c-, règne et on note une diminution de l'efficacité du refroidissement par film.

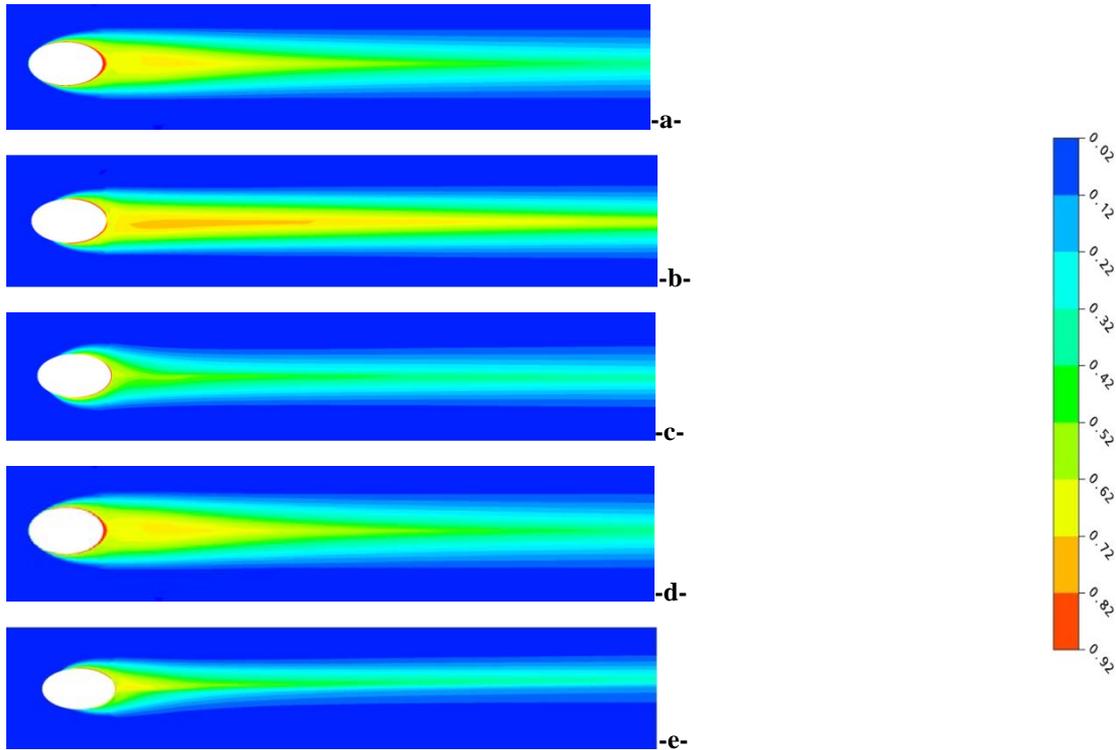


Fig. 6 –Contours de l'efficacité adiabatique sur la plaque pour M=0.5.

La Fig.7 montre les vecteurs de vitesses sur trois plans différents à savoir $x/d=2, 5$ et 9 en aval du trou d'injection pour le cas d'une imperfection proche de la zone d'injection et pour un taux d'injection $M=1.0$, les résultats montrent la formation des deux tourbillons contrarotatifs et une forte pénétration du jet refroidissant dans l'écoulement principal avec l'augmentation du taux d'injection.

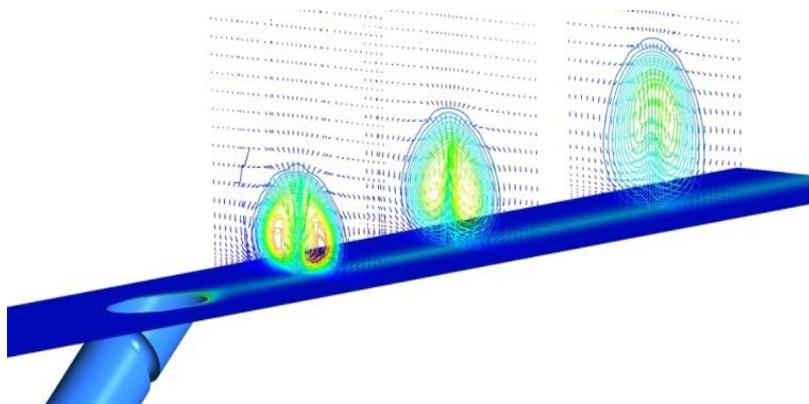


Fig. 7 –Vecteur de vitesse et isolignes de température sur différents plans en aval de l'injection pour le cas -b- avec $M=1.0$.

L'étude de l'influence de la position des défauts sur l'efficacité du refroidissement par film nous ramène à une comparaison entre les différents cas étudiés, cette comparaison est illustrée sur la Fig.8. L'analyse de cette figure permet de

voire clairement l'influence de la position et le nombre des défauts sur la variation de l'efficacité de refroidissement le long d'une ligne centrale en aval du trou d'injection.

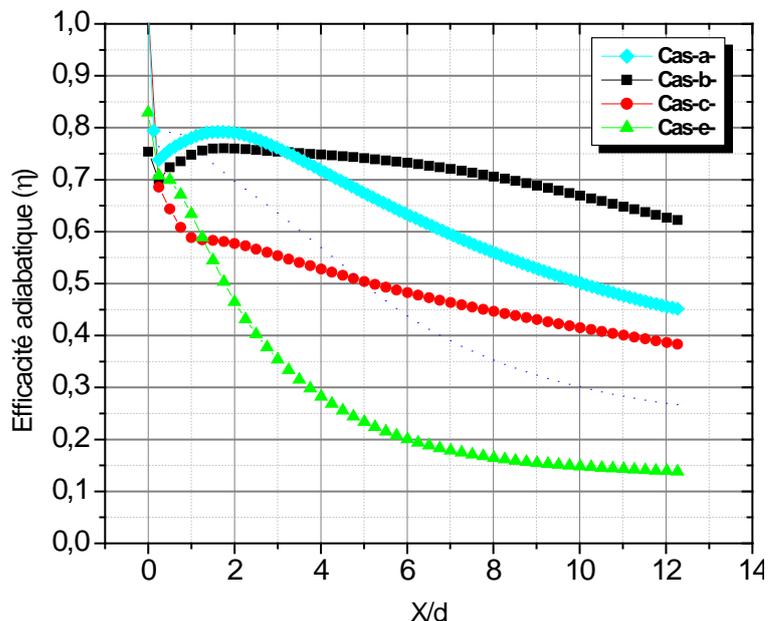


Fig. 8 –Efficacité de refroidissement sur la ligne centrale.

La Fig.8 montre une amélioration de l'efficacité de refroidissement avec la présence d'un défaut au voisinage de la zone d'injection (cas-b-) par rapport au cas parfait. L'efficacité de refroidissement devient plus faible en présence d'une imperfection un peu plus profonde et le plus faible niveau de refroidissement est détecté en présence de trois imperfections simultanément dans des positions différentes.

5 Conclusion

Parmi les paramètres géométriques qui entraînent une variation significative de l'efficacité du refroidissement par film, l'état de la surface interne des passages de l'air de refroidissement constitue un paramètre qui mérite plus d'attention. La présente étude représente un modèle numérique du refroidissement par film appliqué sur une plaque plane avec la présence des imperfections en forme torique dans le trou d'injection. L'influence du nombre et de la position de ces imperfections a été étudiée par des simulations numériques. Les résultats obtenus ont été comparés avec des mesures expérimentales publiées par Jovanovic et al. [8], cette comparaison a montré une concordance satisfaisante entre les résultats numériques et les données expérimentales.

Les résultats ont montré aussi qu'un défaut proche de la sortie peut causer une amélioration de l'efficacité de refroidissement par film par rapport à un trou parfait sans aucun défaut. Si le défaut est un peu plus profond dans le trou il provoque une nette diminution de l'efficacité de refroidissement pour des faibles taux d'injection, cette diminution disparaît quand le défaut est bien plus profond, ceci permet une distance suffisante pour que le l'écoulement tend à se rétablir à l'intérieur du trou.

REFERENCES

- [1] A. Guelailia, A.Khorsy and M. K. Hamidou, Computation of leading edge film cooling from a CONSOLE geometry (CONverging Slot hOLE). Thermophys. Aeromech. Vol. 23 N°3 (2016) pp. 33-42.
- [2] A. Khorsi, A. Guelailia and M. K. Hamidou, Improvement of film cooling effectiveness with a small downstream block body. J. Appl. Mech. Tech. Phys. Vol. 57 N°4 (2016) pp. 666-671.
- [3] J. C. Han, S. Dutta and S. Ekkad, Gas turbine heat transfer and cooling technology. CRC Press, 2012.
- [4] R. P. Dring, M. F. Blair and H. D. Joslyn, An experimental investigation of film cooling on a turbine rotor blade. J.

- Eng. Gas Turbines Power. Vol. 102 N°1 (1980) pp. 81-87.
- [5] U.Drost, A.Böles, Investigation of detailed film cooling effectiveness and heat transfer distributions on a gas turbine airfoil. *J. Turbomach*, Vol.121 N°2 (1999) pp.233-242.
- [6] A. K. Sinha, D. G. Bogard; M. E. Crawford, Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio. *J. Turbomach*, Vol.113 N°3 (1991) pp.442-449.
- [7] R. J. Goldstein, T. Yoshida, The influence of a Laminar Boundary Layer and Laminar Injection on Film Cooling Performance. *J. Heat Transfer*. Vol.104 N°2 (1982) pp.355-362.
- [8] M.B. Jovanovic, Film cooling through imperfect holes. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, Netherlands, 2006.
- [9] F.R. Menter, Zonal two-equation ω - k turbulence model for aerodynamic flows, in: Proceedings of the 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida, U.S.A, 1993, AIAA paper 2906, pp1-21.
- [10] D. C. Wilcox, Turbulence modeling for CFD. CA: DCW Industries, Inc. La Canada, California, First Edition, 1994.
- [11] D. R. Pedersen, E. R. G. Eckert and R. J. Goldstein, Film cooling with large density difference between the mainstream and the secondary fluid measured by the heat-mass transfer analogy. *J. Heat Transfer*, Vol.99 N°4 (1977) pp.620-627.
- [12] J. E. Mayhew, J. W. Baughn, and A. R. Byerley, The effect of free stream turbulence on film cooling adiabatic effectiveness. *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.24 N°5 (2003) pp.669-679.