

Étude du refroidissement interne d'une cascade d'aubes

Karima HEGUEHOUG ep BENKARA-MOSTEFA^{1*}, Nouredine LOUAHADJ, Abd el djelil HATTAB

¹Laboratoire d'Énergétique Appliquée et de Pollution
Département de Génie mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie. Université Frères Mentouri
– Constantine 1. Campus Chaab Ersas, 25000 Constantine, Algérie

* auteur correspondant : benkarak@gmail.com

Résumé:

La présente étude s'intéresse à la simulation numérique de l'écoulement à travers une cascade d'aube en tenant compte de leur refroidissement interne. L'étude s'est limitée à une seule aube avec des conditions de périodicité imposée. L'écoulement étant considéré bidimensionnel et stationnaire. Le fluide est turbulent et incompressible. Le maillage du domaine est générée par le préprocesseur Gambit et la simulation est conduite au moyen du code Fluent, qui définit, et résout l'ensemble des équations régissant le problème. L'effet de la turbulence sur l'écoulement est pris en compte en utilisant le modèle de turbulence (k – ε) standard. En plus du coefficient de frottement le long de la paroi, les champs de pression, de vitesse, d'énergie cinétique turbulente ainsi le champ thermique dans le domaine ont été étudiés.

Mots clés : Aube, Extrados, Refroidissement, Fluent, Turbulence.

Nomenclature

$C_{1\varepsilon}; C_{2\varepsilon}; C_{\mu}$	Constantes	ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (m^2/s^3)
P	Pression (Pa)	μ	Viscosité dynamique (kg/ms)
U_i	Composante de la vitesse moyenne suivant la direction i (m/s)	μ_t	Viscosité dynamique turbulente (kg/ms)
X_i	Coordonnées	ρ	Masse volumique (kg/m^3)

Symboles grecs

1. Introduction

Les turbomachines sont des machines rotatives composées d'une ou plusieurs séries d'aubages, fixées alternativement sur le stator et sur le rotor.

Les turbomachines représentent aujourd'hui un produit de très haute technologie. Elles sont utilisées aujourd'hui dans un très large domaine de la technique moderne (production d'électricité, propulsion des véhicules, pompe à chaleur). Mais leurs problèmes se multiplient encore par le fait qu'elle doivent travailler dans des conditions différentes en dehors de leur point de fonctionnement nominal et supporter des changements brutaux de conditions de fonctionnement, entre autre de ces problèmes celui des aubes sollicitées aux très hautes température d'où la nécessité donc d'un refroidissement efficace.

Dans ce sens d'importants progrès ont été réalisés ces dernières années grâce à l'apparition de nouvelles techniques de refroidissement et différents travaux expérimentaux et numériques ont été consacrés à l'étude de l'écoulement à travers les aubes des turbomachines vu que la fatigue prématurée de la machine est due essentiellement aux roues et aux directrices. Azzi et Abidat (2001) se sont intéressés à l'étude numérique du refroidissement par film d'une aube symétrique. Une méthode aux volumes finis combinée avec une technique multi bloc a été utilisée pour la résolution des équations de conservation des paramètres moyens de l'écoulement turbulent et incompressible. Cette étude a permis de montrer l'efficacité du refroidissement et l'influence de la position du trou et du taux d'injection. Giel et al (2003) ont fait un travail expérimental pour l'étude du transfert thermique d'un rotor d'une turbine dont les températures ont été mesurées à l'aide de cristaux liquides calibrés. Les mesures ont été faites pour des écoulements tridimensionnels au passage d'une cascade d'aube et ce pour différents nombres de Reynolds, différents Mach et trois angles d'incidences 0 et ± 2 degrés. Ben Mansour et al (2004) ont opté pour une approche analytique pour la détermination des profils de température des aubes du rotor et du stator d'une turbine HP. Cette approche à l'aide du logiciel cosmos design Star a permis de tracer d'une part, la distribution des températures sur différentes sections transversales et longitudinales des aubes, et d'autre part, d'évaluer l'efficacité de refroidissement sur le contour de celles-ci. I.Ieronymidis et al (2010) ont mesuré, d'une façon détaillée la distribution du coefficient de transfert thermique sur les surfaces internes d'une aube de turbine à gaz avec la technique de mesures à cristaux liquides transitoires. Les résultats de l'étude montrent que dans les trous de passage du fluide de refroidissement, le niveau moyen des coefficients de transfert thermique est fortement influencé par les écoulements croisés à l'entrée.

L'objectif du présent travail a été une simulation numérique de l'écoulement à travers une cascade d'aube en tenant compte de leur refroidissement interne.

L'étude s'est limitée à une seule aube vue des conditions de périodicité imposée, l'écoulement étant considéré turbulent stationnaire et incompressible.

La simulation est conduite au moyen du code fluent pour définir générer le maillage et résoudre l'ensemble des équations régissant le problème l'effet de la turbulence sur l'écoulement est pris en compte en utilisant le modèle de turbulence (k- ϵ) ϵ .

2. Formulation Mathématique

Dans le présent travail, l'écoulement considéré est bidimensionnel, stationnaire, turbulent incompressible, avec transfert de chaleur. Dans ce qui suit seront décrites les équations traduisant le transport de masse, de quantité de mouvement et de la température régissant, un tel écoulement.

2.1. Equations du champ moyen :

➤ **Equation de continuité:**

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

➤ **Equation de transport de quantité de mouvement:**

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i' u_j'}) \quad (2)$$

Les équations de Reynolds moyennées obtenues font apparaître un nombre d'inconnues Supplémentaires $(\overline{u_i' u_j'})$ d'où la nécessité d'un modèle de turbulence afin de fermer le système d'équations à résoudre.

➤ **Equation de conservation d'énergie :**

Pour tenir compte du transfert de chaleur, l'équation d'énergie considérée pour un écoulement incompressible avec des propriétés constantes du fluide et une dissipation visqueuse négligeable est :

$$\frac{\partial (\rho c_p u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{dT}{dx_j} - \rho c_p \overline{U_j t'} \right) + q + \phi \dots \dots \dots \quad (3)$$

2.2. Modèle de turbulence k-ε:

Pour la présente étude le choix s'est porté sur le modèle le plus couramment utilisé : le modèle (k-ε) associé à l'hypothèse de type Boussinesq reliant les contraintes de Reynolds au taux de déformation moyen :

$$[-\overline{\rho u_i' u_j'}] = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (4)$$

Où : k = : représente l'énergie cinétique turbulente.

Par analogie avec la viscosité cinématique laminaire caractérisée par une vitesse (des Molécules) et une distance (le libre parcours moyen), la viscosité turbulente, caractérisée par une

vitesse \sqrt{k} et une distance $(l = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\epsilon})$, est donnée par :

$$\nu_t = c_\mu \sqrt{k} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\epsilon} = c_\mu \frac{k}{\epsilon} \quad (5)$$

Avec $c_\mu = 0.009$, et ϵ : le taux de dissipation.

k et ϵ , sont obtenus à partir de leur équation de transport présentée ci-dessous.

➤ **Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k:**

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

➤ **Equation de transport du taux de dissipation ε**

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

σ_k et σ_ε sont respectivement les nombres de Prandtl turbulents relatifs à l'énergie cinétique turbulente et au taux de dissipation.

$$C_{1\varepsilon}=1.44, \quad C_{2\varepsilon}=1.92, \quad \sigma_k=1.0, \quad \sigma_\varepsilon=1.3.$$

Le terme de production G_k est donné par :

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = \rho v_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

3. Procédure de résolution :

3.1.Géométries :

L'étude a été menée autour d'un profil isolé 2D, le domaine de calcul est une surface de dimensions 300 mm x 850mm avec une entrée, une sortie et une périodicité imposée sur les deux cotés latéraux.

Pour un premier temps l'étude a été faite sur une aube sans trou de refroidissement (figure 1) afin de détecter les parties les plus sollicitées aux hautes températures, pour ensuite passer à l'étude d'une aube avec trou de refroidissement avec une vitesse et une température respectivement de 35 (m/s) et 320 °k imposées à l'entrée. Une pression atmosphérique à la sortie et une température de 300 °k imposée au trou refroidissement (figure 2).

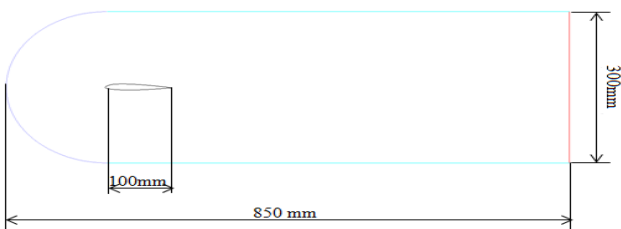


Figure 1: géomètre sans trou de refroidissement.

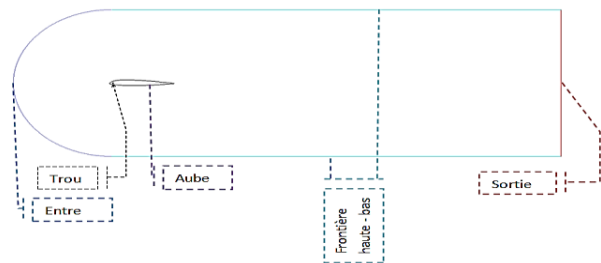


Figure 2: géomètre avec trou de refroidissement

3.2.Maillage :

Un test de l'effet du maillage sur la solution a été effectué en utilisant différents nombres de nœuds.

	Maillage (1)	Maillage (2)	Maillage (3)
Nombre de Noeuds	112635	254118	1007059

Tableau 1: nombre de nœuds pour les 3 maillages

Il a été opté pour un maillage hexaédrique non structuré avec un nombre nœuds de 254118 figure (3).

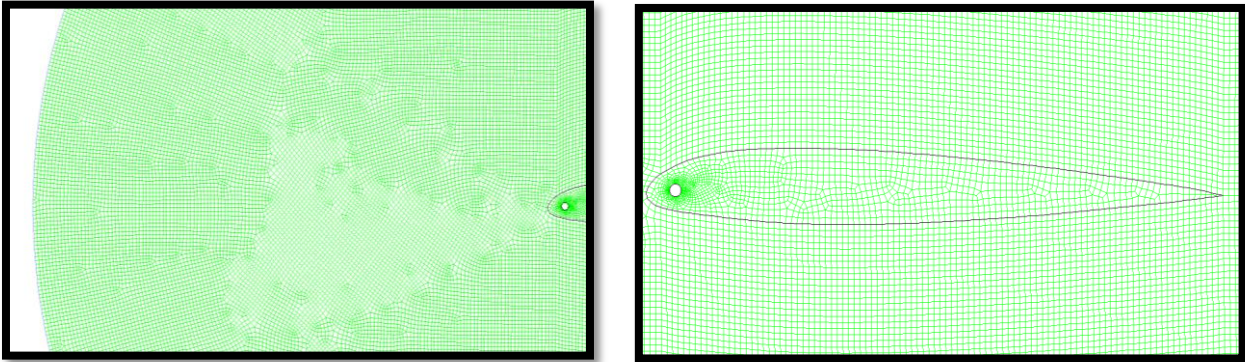


Figure 3: maillage en amont et autour de l'aube.

4. Resultats et discussion :

4.1. Effet du maillage :

Les figures (4 et 5) ci-dessous, montrent respectivement, les profils de pression autour de l'aube et de la vitesse pour deux différentes positions $x=-20$ mm et $x=50$ mm, les différentes courbes ont été obtenues avec des maillages constitués de 112635, 254118 et 1007059 nœuds. La différence n'est pas vraiment importante, et donc on a opté pour un maillage composé de 254118 nœuds.

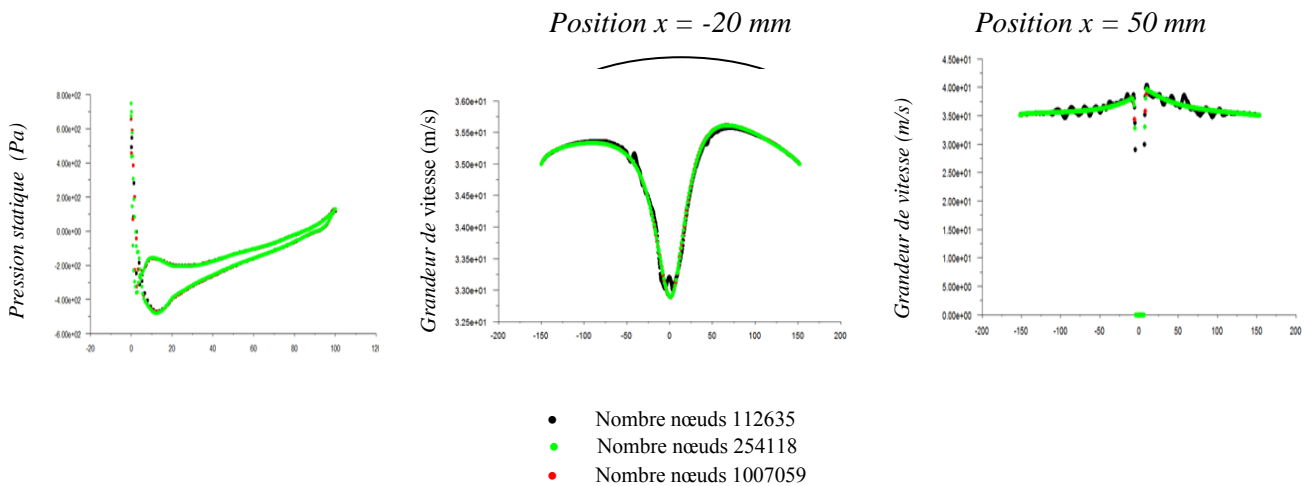


Figure 4 : Profil de pression autour de l'aube (Pa)

Figure 5 : Profils de vitesse (m/s)

4.2. Discussion des Résultats :

a) Champ de pression et de vitesse :

Dans un premier temps, une simulation numérique pour l'aube sans trou de refroidissement a été menée. Les résultats des contours de pression, de vitesse

respectivement représentés par les figures 6 et 7 n'ont révélés qu'aucune variation pour ces deux paramètres.

Sur le profil figure (6 a et b), il a été remarqué une légère chute de pression due au frottement du fluide est à noter, sur le premier tronçon de l'extrados, la pression atteint sa valeur minimale puis augmente légèrement sur le deuxième tronçon. Au niveau du bord d'attaque la pression est maximale (toute l'énergie cinétique est transformée en énergie de pression) une augmentation moins importante est aussi observée au bord de fuite, par ailleurs on a une pression uniforme dans tout le domaine.

b) Champ de vitesse :

Sur les figures (7a et b) on note une vitesse uniforme à l'entrée égale à la valeur imposée comme condition à la limite. À l'encontre du profil la vitesse diminue et atteint sa valeur minimale (point de stagnation). Une accélération du fluide est observée de part et d'autre du profil et particulièrement sur l'extrados : résultats consistant avec celui de la pression.

c) Champ de température :

Sur la figure (8.a) on remarque que l'aube sans refroidissement est très affectée par la température par contre sur la figure (8b) on remarque qu'au niveau de l'aube la variation de température est très claire, d'où l'effet du refroidissement, il ya donc transfert de chaleur entre le fluide et l'aube, et qu'ensuite cette chaleur est transportée par conduction dans l'aube. L'effet du refroidissement sur persiste même dans la zone de sillage en aval de l'aube jusqu' à la sortie. Par ailleurs pratiquement tout le domaine d'étude est porte à la température de 320 °K.

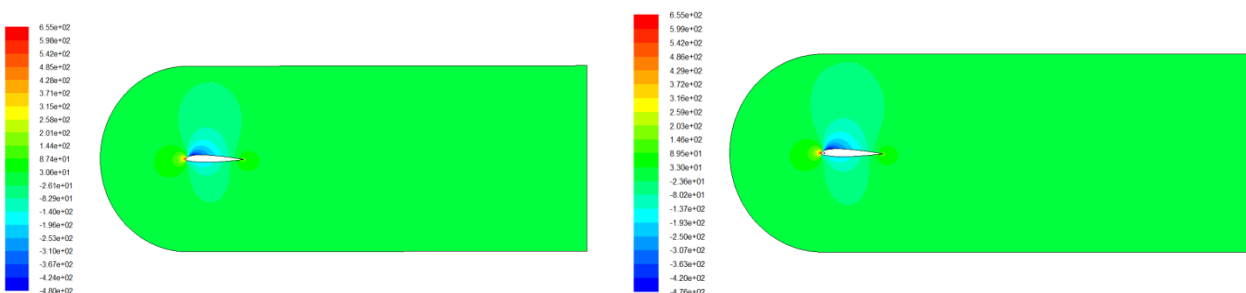
Pour le nombre de Nusselt représenté par la figure (9) on remarque que sa valeur maximale est au niveau de l'extrados où le gradient de température est le plus élevé, expliqué par un transfert de chaleur important entre le fluide et la paroi. Ailleurs la variation est monotone puisque on s'éloigne du trou de refroidissement et que d'aube est de plus en plus chauffée et donc le transfert de chaleur est moindre.

d) Coefficient frottement :

Les figures (10 et 11) montrent la variation du coefficient de frottement au niveau du profil, ce coefficient atteint sa valeur minimale au bord d'attaque (point d'arrêt) et au bord de fuite (point de décollement) par contre il est maximal surtout sur l'extrados où le gradient de vitesse est important.

e) Champ l'énergie cinétique turbulente :

La figure (12) caractérise l'évolution de l'énergie cinétique turbulent une distribution assez symétrique est visible autour du profil avec une forte énergie cinétique turbulente observée au bord d'attaque et sur la première partie de l'extrados due au cisaillement généré par le gradient de vitesse.



Sans refroidissement
refroidissement

avec

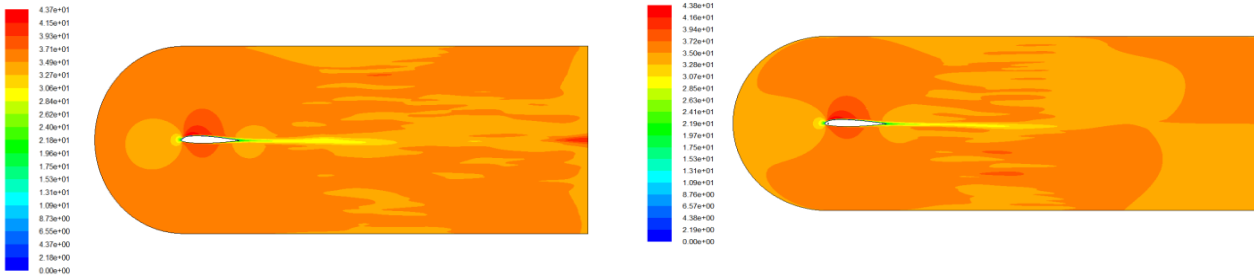
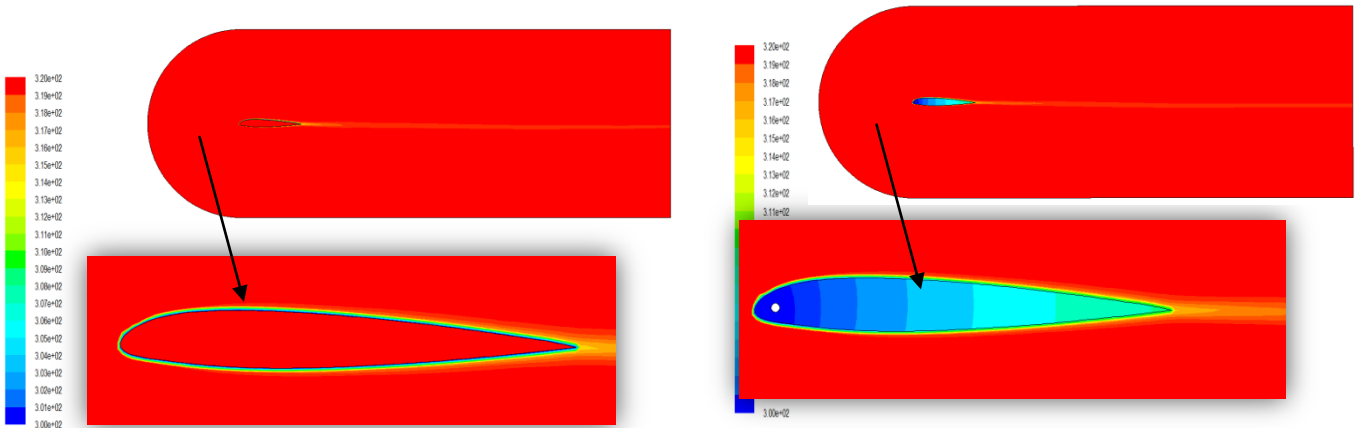


Figure 6 : Contour de pression (Pa)

Sans refroidissement

avec refroidissement

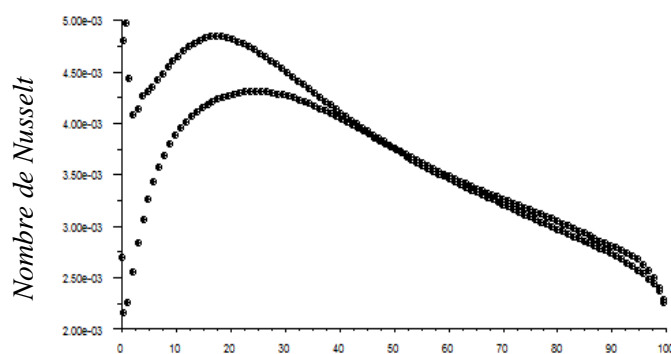
Figure 7 : Contour de la grandeur de vitesse (m/s)



Sans refroidissement

avec refroidissement

Figure 8 : Contour de la température (°k)



Position (mm)

Figure 9 : Profil du nombre Nusselt autour de l'aube

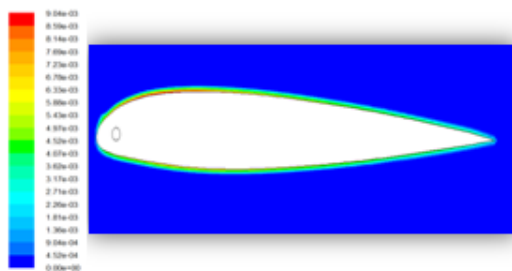


Figure 10 : Contour de coefficient de frottement

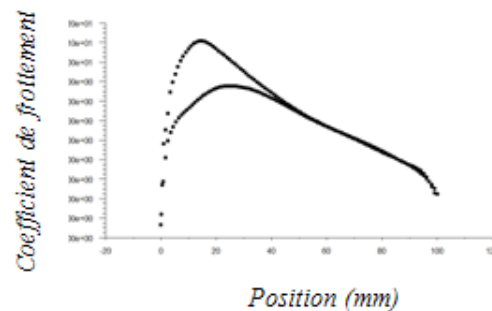


Figure 11 : Profil du coefficient de frottement autour de l'aube

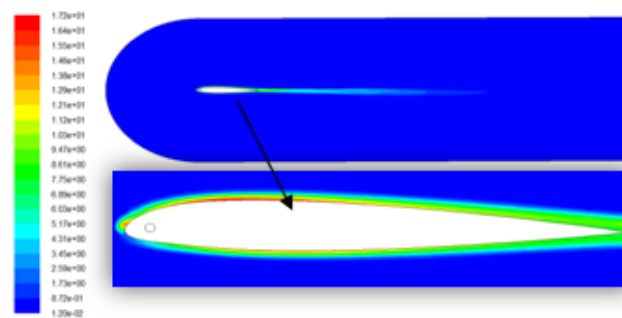


Figure 12 : Contour de l'énergie cinétique turbulente (m^2/s^2)

5. Conclusion :

L'étude du refroidissement interne à travers une cascade d'aube a été l'objectif du présent travail. L'étude s'est limitée à une seule aube avec des conditions de périodicité imposée.

Notre outil de simulation numérique nous a permis de faire un calcul préliminaire sans refroidissement qui a bien montré que l'aube est très sollicitée aux hautes températures ce qui nous a motivé à faire une deuxième étude avec un trou de refroidissement.

En perspective, et devant l'intérêt de ce travail on pourrait considérer des configurations similaires avec plusieurs trous de refroidissement, et voir l'effet du nombre et de l'emplacement ces derniers.

References

1. A. Azzi, M. Abidat. Prédiction numérique du refroidissement par film près du bord d'attaque d'une aube symétrique: influence du taux d'injection. Science et technologie (2001) 97-108.
2. P.W. Giel, R. Bunker, G. James, J. B. Robert. Heat transfer measurement and predictions on a power generation gas turbine blade. Book Park, OH, NASA / CASI. 2003
3. S. Benmansour, M. Kaci, K. Dif, M. Bellouti. Etude du refroidissement d'une aube de Turbine haute pression (HP). 4^{ème} journée de la mécanique. EMP. Alger. 23 & 24 Mars (2004).
4. IERONYMIDIS I. & al. Detailed Heat Transfer Measurements in a Model of an Integrally Cast Cooling Passage. Journal of Turbomachinery. Avril (2010) Vol. 132, pp. 1-9.