

Simulation numérique du refroidissement d'un composant électronique par déflexion d'un écoulement d'air

Ahlem ARFAOUI^{1,2,*}, Mourad REBAY¹, Rejeb BEN MAAD² et Jacques PADET¹

¹ laboratoire UTAP-Thermomécanique, Faculté des sciences, BP 1039, 51687 Reims, France

² Laboratoire d'Energétique et Transferts Thermique et Massique, Faculté des sciences, 2092 Manar II, Tunisie

* (auteur correspondant : ahlem.arfaoui@etudiant.univ-reims.fr)

Résumé – Un échauffement excessif réduit la durée de vie du composant électronique et peut provoquer sa défaillance. Dans le but d'étudier le refroidissement à air des composants nous présentons ici une étude numérique du transfert convectif sur une plaque plane placée à l'entrée d'un écoulement laminaire d'air de vitesse uniforme. Sur cette plaque est monté un bloc en céramique à l'intérieur duquel est incrusté un élément chauffant, simulant ainsi un circuit intégré parallélépipédique sur une carte électronique. Des déflecteurs ont été implantés sur la plaque, en amont du bloc, pour guider le flux d'air de refroidissement vers le bloc. Les résultats mettent en évidence l'influence de l'angle d'inclinaison et de la hauteur sur l'amélioration de l'échange convectif à l'interface céramique-air.

Nomenclature

a	<i>Coté du bloc en Zircone, m</i>	h	<i>coefficient de convection, $Wm^{-2}K^{-1}$</i>
e	<i>épaisseur des déflecteurs, m</i>	T	<i>température, K</i>
H	<i>Hauteur du bloc en Zircone, m</i>	H'	<i>Hauteur des déflecteurs, m</i>

1. Introduction

Les avancées des techniques de gravure des circuits intégrés et l'évolution de l'électronique de puissance permettent d'avoir des composants de plus en plus petits. Par conséquent, les flux de chaleur à évacuer ne cessent de s'élever. La surchauffe des composants réduit leur durée de vie et peut provoquer des contraintes de fonctionnement. L'amélioration de leur refroidissement aidera donc à augmenter leur fiabilité [1, 2].

Quoique le refroidissement de certains composants de forte puissance (microprocesseurs, diodes laser...) se fait de plus en plus avec écoulement d'un liquide ou avec changement de phase, le refroidissement par écoulement d'air demeure encore très utilisé. En effet, ce type de refroidissement, peu coûteux, est bien approprié pour des composants de moyenne et de faible puissance tels que le processeur des cartes graphiques, les disques durs, les racks de serveur, de réseau ou de télécommunication. Il constitue l'une des solutions énergétiques les plus économiques [3, 4].

L'une des solutions pour augmenter l'efficacité d'un système de refroidissement à air, en particulier quand il n'y a pas assez de place pour installer un radiateur à ailettes ou un ventilateur sur le composant, consiste à implanter des déflecteurs qui jouent le rôle de dirigeants de l'écoulement d'air dans les boîtiers contenant les composants. Ces déflecteurs guident le flux d'air circulant dans le boîtier vers les zones les plus critiques sur les cartes [4,

5]. Ces solutions sont aussi préconisées lorsqu'il s'agit de refroidir des convertisseurs de courant ou de tension. Ces derniers peuvent générer des champs magnétiques qui perturbent le fonctionnement des pompes ou des ventilateurs entraînant les fluides de refroidissement s'ils étaient placés à proximité des composants.

2. Modélisation

Nous présentons ici une étude numérique par volumes finis du transfert convectif sur une plaque plane en PVC d'épaisseur égale à 5 mm, placée à l'entrée d'un écoulement laminaire d'air de vitesse 5 m/s (Figures 1 et 2). Sur cette plaque est monté un bloc en céramique (zircone) de 5x5 cm² et de 0,5 cm de hauteur, à l'intérieur duquel est incrusté un élément chauffant de 1x1 cm² (simulant une puce électronique). L'élément est placé au centre du bloc ($x = y = 2,5$ cm et $z = 2,5$ mm). Des déflecteurs ont été implantés sur la plaque de PVC, en amont du bloc de zircone, guidant ainsi le flux d'air de refroidissement vers celui-ci. Ils sont placés à une distance arbitraire de 1 cm du bloc et sont de hauteur H' .

Afin de déterminer, en régime stationnaire, l'influence des déflecteurs sur la distribution spatiale du coefficient d'échange de chaleur, nous avons fait varier l'angle d'inclinaison de : $\alpha = 0^\circ$ (sans déflecteur), $\alpha = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ et $\alpha = 45^\circ$. Nous avons également fait varier leur hauteur, nous avons considéré : $H' = H$; $H' = 2H$ et $H' = 4H$.

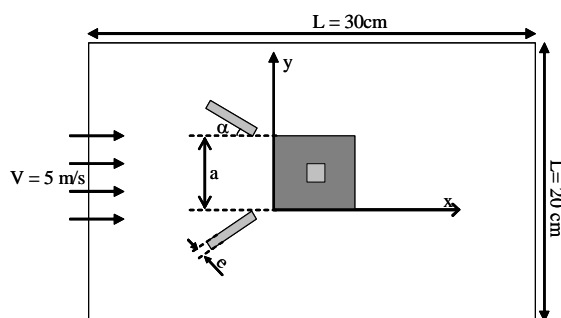


Figure 1 : Schéma du dispositif (vue de dessus)

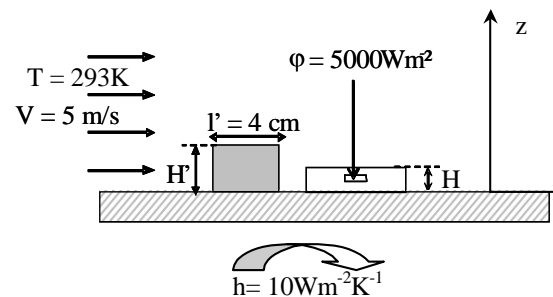


Figure 2 : Schéma du dispositif (vue de face)

Nous avons utilisé le code de calcul Fluent. Il s'agit d'un solveur utilisant la méthode de volumes finis pour résoudre les équations de Navier-stokes et de l'énergie dans le domaine d'étude. Le couplage aux différentes interfaces solide-solide et solide-air est assuré par les égalités des flux et des températures de part et d'autre de ces interfaces. En utilisant le pré-processeur GAMBIT, nous avons réalisé la géométrie en 3D de la moitié du domaine de calcul, de hauteur 20cm, vu la symétrie du modèle. Le maillage de l'ensemble est composé d'un maillage structuré hexaédrique pour sa globalité (90x30x30). Seul le maillage aux niveaux des déflecteurs est non-structuré en tétraédrique (10x20x30). La petite maille est de dimensions 1mm x 2mm x 2mm

3. Résultats et discussions

3.1. Influence de l'angle d'inclinaison

3.1.1. Variation du coefficient d'échange convectif

Sur la figure 3, les courbes en continu représentent le cas sans déflecteurs ($\alpha = 0^\circ$) et les courbes en discontinu sont associées au cas où les déflecteurs seraient positionnés suivant un

angle $\alpha = 10^\circ$. On s'intéresse au transfert de chaleur sur les surfaces les plus critiques sur la carte. Les courbes représentent donc le coefficient de convection sur la surface du bloc en Zirconium à différentes positions : $y = 0$ (bord du bloc en zirconium); 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; et 2,5 cm (milieu du bloc).

La situation où $\alpha = 0^\circ$ correspond à un écoulement sur une plaque plane présentant une marche ascendante de hauteur H . Le coefficient d'échange au dans ce cas, diminue légèrement quand x augmente (figure 3). Au passage du bloc en céramique, l'écoulement se sépare et se décolle à partir du bord d'attaque (figure 6-a). Lorsque l'on est en présence d'un écoulement séparé, la région de recollement est une région de transfert de chaleur maximum ; par contre celle de la séparation est une région dans laquelle le coefficient d'échange diminue. Ces effets atténuent les fortes valeurs que pourrait prendre le coefficient h_x près du bord d'attaque du bloc en zirconium si celui-ci n'était pas surélevé par rapport à la surface de la plaque de PVC.

Quand $\alpha = 10^\circ$, quel que soit y , le coefficient d'échange est plus élevé que dans le cas sans déflecteurs, localement près du bord d'attaque (x faible). Il diminue rapidement quand x augmente. Il passe d'environ 37 au bord d'attaque du bloc à des valeurs proches de 20 à sa sortie. En faisant varier y , nous constatons que les courbes sont très voisines pour les faibles valeurs de x , elles se dissocient à mesure que x augmente. Ce qui signifie qu'en plus de sa dépendance de la coordonnée axiale x , le coefficient d'échange dépend aussi de la coordonnée transversale y : il est plus élevé proche de $y = 0$ qu'au centre ($y = 2,5$ cm). La déviation de l'écoulement vers le centre de la surface du bloc introduite par les déflecteurs, provoque donc une augmentation globale du coefficient d'échange. Cette augmentation contrebalance la diminution du coefficient due au décollement de la couche limite. Une comparaison avec les résultats de la littérature n'est pas possible ici, car ces dernières sont établies pour des situations où la condition thermique (flux ou température uniforme) est appliquée à l'interface fluide-solide. Or, dans notre étude, le flux est généré dans un volume de $10 \times 10 \times 1$ mm³ situé au centre du bloc en céramique et non sur l'interface avec l'air. De plus, la visualisation du flux et de la température sur la surface du bloc de zirconium montre que celle-ci n'est pas uniforme (Figure 4).

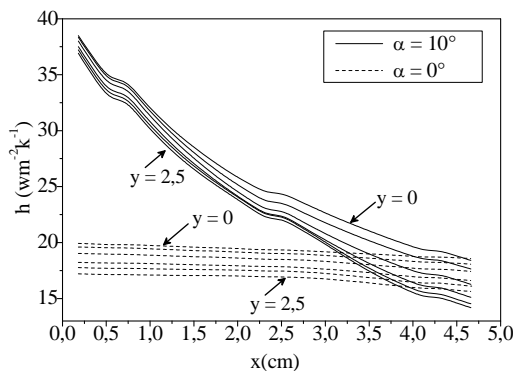


Figure 3 : Variation du coefficient d'échange pour différentes coordonnées transversales

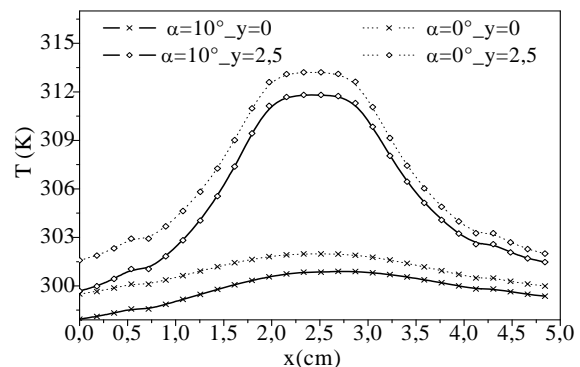


Figure 4 : Variation de la température à la surface du bloc en Zirconium

La figure 4 illustre l'évolution de la température surfacique en fonction de x sur le bord ($y = 0$) et sur le milieu du bloc ($y = 2,5$ cm) pour $\alpha = 0$ et $\alpha = 10^\circ$. Quel que soit l'angle α , la température augmente, passe par un maximum, puis diminue quand x augmente. Elle est maximale entre $x = 2$ et $x = 3$ cm. Un calcul, avec Fluent, de l'épaisseur de la couche limite se

développant sur la plaque de PVC ($\delta = 4,92 \times \text{Re}_x^{-1/2}$ [6]) montre que celle-ci est égale à 3,1 mm à l'endroit où le bloc est placé. L'effet conjugué de cette couche limite ainsi que du décollement de l'écoulement provoque des tourbillons qui modifient la structure de l'écoulement sur la surface du bloc, et par conséquent, le champ de température surfacique.

Les variations du coefficient d'échange en fonction de x , pour les 4 angles d'inclinaison α étudiés, sont représentées sur les figures 5a-5d. Nous apercevons une différence dans les évolutions de h_x aussi bien en fonction de α qu'en fonction de y . Quel que soit α , le coefficient d'échange dans la zone centrale du bloc de zircon ($y = 2$ et $y = 2,5$ cm) est plus faible que celui près la zone du bord ($y = 0$ et $y = 0,5$ cm). La chaleur produite dans le centre du bloc diffuse latéralement dans ce dernier, et est extraite en partie par l'écoulement d'air sur la face supérieure. Cependant, au niveau du bord, la chaleur est aussi évacuée par l'écoulement d'air sur la face latérale.

En outre, nous observons deux légères stagnations de h_x : la première se situe à l'entrée du bloc (au alentours de $x = 0,7$ cm) et la deuxième au centre du bloc (en $x = 2,5$ cm). La deuxième, présente pour α différent de 0, peut s'expliquer par l'augmentation de la température surfacique en s'approchant de la zone centrale du bloc (voir graphe 4). Cependant, la première pourrait être due à l'effet conjugué du rouleau transversal créé par les déflecteurs et le rouleau longitudinal dû à la marche inhérente au bloc. Pour $\alpha = 0$, le coefficient d'échange h_x est constant entre $x = 0$ cm et $x = 2,5$ cm, puis il diminue pour $x > 2,5$ cm.

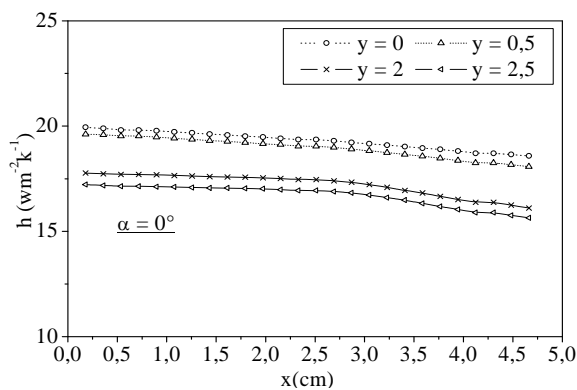


Figure 5-a : Variation de h dans le cas d'une configuration sans déflecteurs

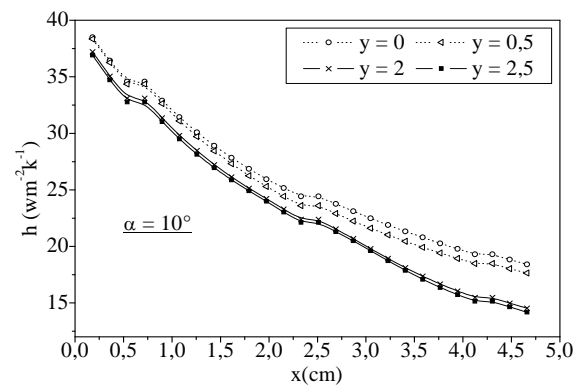


Figure 5-b : Variation de h dans le cas où $\alpha = 10^\circ$

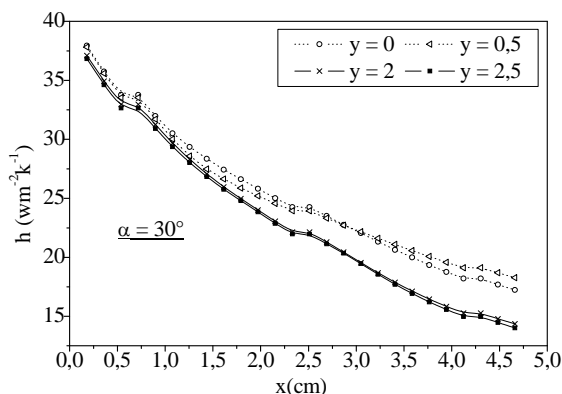


Figure 5-c : Variation de h dans le cas où $\alpha = 30^\circ$

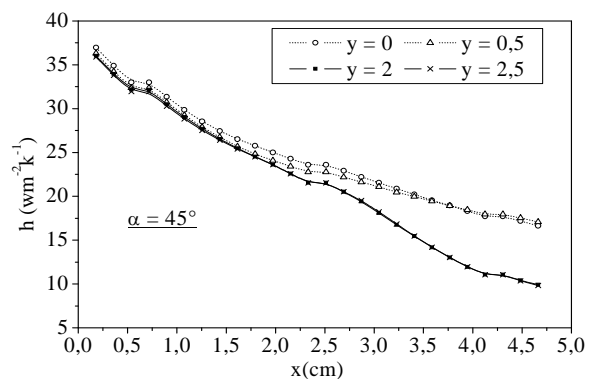


Figure 5-d : Variation de h dans le cas où $\alpha = 45^\circ$

Le Tableau 1 présente les valeurs du coefficient d'échange moyen (h_{moy}) sur toute la surface du bloc, en fonction de l'angle d'inclinaison α . Il est à noter que h_{moy} est maximum quand $\alpha = 10^\circ$. Par rapport à $\alpha = 0^\circ$, l'amélioration du transfert convectif est de 38% pour $\alpha = 10^\circ$, de 30% pour $\alpha = 30^\circ$ et de 29% pour $\alpha = 45^\circ$. Les lignes de courant, représentées sur les figures 6a-6d montrent que l'augmentation excessive de α crée une zone de re-circulation en aval du bloc de céramique, bloquant ainsi l'écoulement et diminuant par conséquent le coefficient d'échange.

α ($^\circ$)	0	10	30	45
h_{moy} ($\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$)	17,5	24,3	22,9	22,6

Tableau 1 : Influence de l'angle d'inclinaison des déflecteurs sur la variation de h_{moy}

3.1.2. Lignes de courant

La représentation graphique des lignes de courant au niveau du plan horizontal ($z = 0,5$ cm, soit sur la surface du bloc en Zirconite) montre la présence des zones de recirculation (Figure 6-a, 6-b, 6-c et 6-d). Pour $\alpha = 0$, nous observons la présence de deux zones de recirculation. Ces dernières sont formées à partir de l'enveloppe de vitesse créée de part et d'autre des parois du bloc en Zirconite et de sa surface (Figure 6-a). En effet, au passage d'un élément perturbateur, l'écoulement se sépare et apparaît en aval des obstacles de zones de faibles vitesses du tourbillon secondaire. En présence des déflecteurs, l'écoulement est perturbé, nous notons une division des zones de circulation (Figure 6-b) qui laisse la place à la formation des tourbillons (Figure 6-c et Figure 6-d).

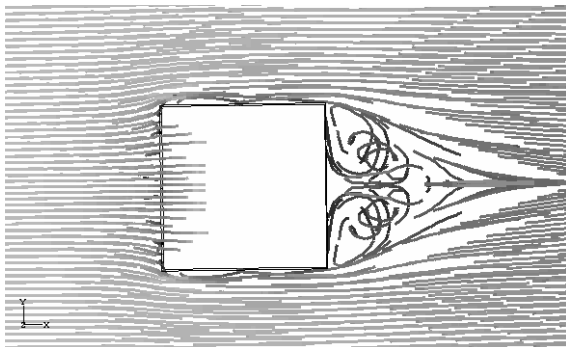


Figure 6-a : Ligne de courant pour la configuration sans déflecteurs

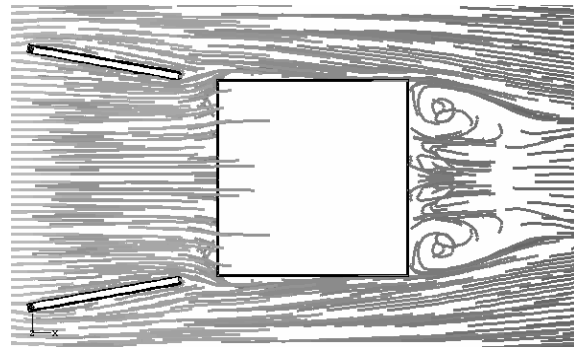


Figure 6-b : Ligne de courant pour la configuration avec déflecteurs ($\alpha = 10^\circ$)

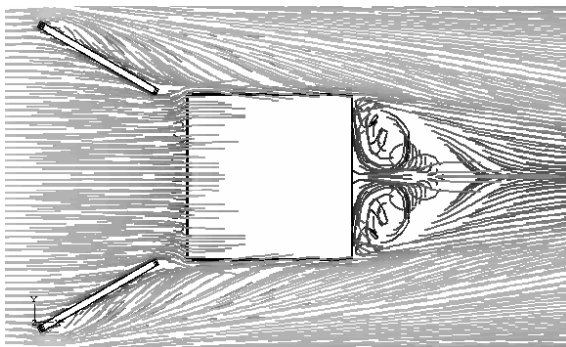


Figure 6-c : Ligne de courant pour la configuration avec déflecteurs ($\alpha = 30^\circ$)

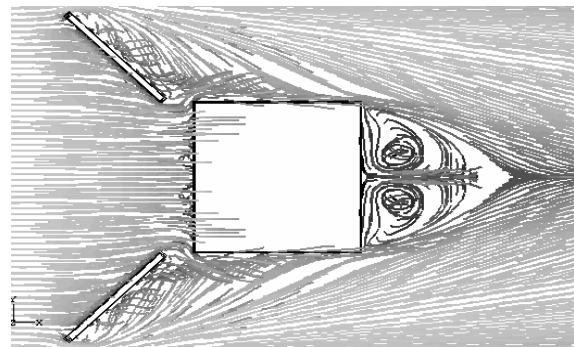


Figure 6-d : Ligne de courant pour la configuration avec déflecteurs ($\alpha = 45^\circ$)

3.2. Influence de la hauteur des déflecteurs, H'

Les Figures 7-a et 7-b représentent le coefficient d'échange au milieu du bloc avec $\alpha = 10^\circ$ et $\alpha = 45^\circ$ pour 3 valeurs de H' : H , $2H$ et $4H$. Pour un angle d'inclinaison faible ($\alpha = 10^\circ$), h_x diminue lorsque x augmente. A l'entrée du bloc, il est aussi élevé que H' est élevé. Mais cette tendance s'inverse à partir du milieu du bloc ; h_x devient plus faible pour $4H$ que pour $2H$ et H . Cependant, le comportement du coefficient d'échange est totalement différent pour $\alpha = 45^\circ$ (figure 7-b). Pour $H' = H$, h_x diminue quand x augmente. h_x diminue à l'entrée puis augmente au milieu du bloc et diminue de nouveau lorsque $H' = 2H$. Enfin, pour $H' = 4H$, h_x augmente à partir du bord d'attaque jusqu'au milieu du bloc puis diminue. Ces différences dans les variations de h avec x peuvent être attribuées aux multiples interactions entre les tourbillons créés par l'effet de marche ascendante avec ceux créés par les déflecteurs.

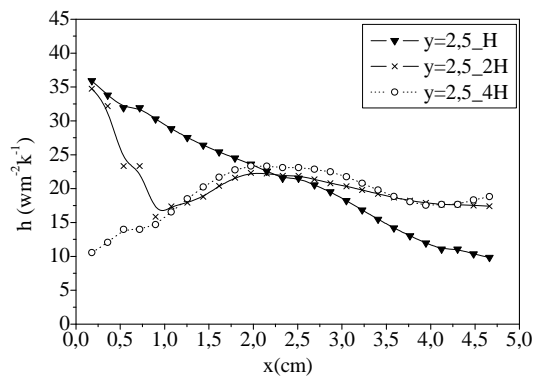


Figure 7-a : Variation de h au niveau de la zone centrale du bloc en Zircone ($\alpha = 10^\circ$)

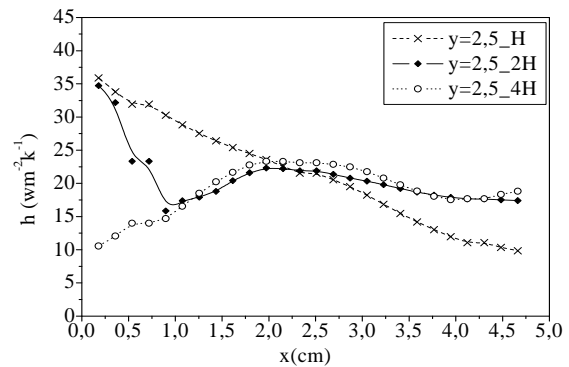


Figure 7-b : Variation de h au niveau de la zone centrale du bloc en Zircone ($\alpha = 45^\circ$)

4. Conclusion

Nous avons présenté une étude numérique pour caractériser l'influence de l'angle de déflexion de l'écoulement d'air ainsi que la hauteur des déflecteurs sur le transfert convectif à la surface d'un bloc en céramique contenant un élément chauffé. On montre que le coefficient d'échange moyen est optimum pour $\alpha = 10^\circ$. Pour des angles d'inclinaison plus importants, le blocage de l'écoulement en aval du bloc chauffé réduit d'une façon importante le coefficient de convection. L'augmentation de la hauteur des déflecteurs a induit des tourbillons qui inter-réagissent avec ceux formés par la marche ascendante. Ces tourbillons peuvent réduire d'une façon importante le coefficient d'échange.

Références

- [1] S. Kakaç, H. Yurucu, and K.A. Hijikata, *Cooling of Electronic Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts, 1994.
- [2] M.M. Mohammed, Air cooling characteristics of uniform square modules array for electronic device heat sink, *J. App. Thermal Engineering*, 26 (2006), 486-493
- [3] J. Yang, L. Wang and H. Li, 2-dimensional CFD simulation and correlation development for optimisation of fin heatsinks in electronic cooling, *J. Thermal Science*, 10 (2001), 363-371
- [4] C.W. Leung, H.J. Kang and S.D. Probert, Horizontal simulated printed circuit board assembly in fully developed laminar flow convection, *Applied Energy*, 56 (1997), 71-91
- [5] T. Stewart and D. W. Stiver, Thermal Optimization of Electronic Systems Using Design of Experiments Based on Numerical Inputs, *Proc. SEMI-THERM 2004*, March 9-11, 2004, San Jose CA, USA, papier n°14
- [6] M. Rebay, J. Padet et S. kakaç Refroidissement d'une micro-structure par convection laminaire forcée », *Proc. Congrès SFT 2005*, Reims 30 mai-2 juin, 2005, 525-530