

Influence de la micromorphologie de surface sur les échanges thermiques convectifs.

Elena SANZ GARCÍA*, Christian NICOT, Rémy POINT, Frédéric PLAZA

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique
UMR CNRS 5509 - Ecole Centrale de Lyon – UCB -INSA Lyon
36 avenue Guy de Collongues 69134 Ecully Cedex, France

* (auteur correspondant elena.sanz@ec-lyon.fr)

Résumé – Dans ce travail on met en évidence de façon expérimentale l'effet de la structuration d'une rugosité tridimensionnelle immergée dans la sous-couche visqueuse d'une couche limite turbulente sur les échanges thermiques. On étudie trois types de surfaces dotées de motifs rugueux différents et on compare avec une surface lisse. Les résultats montrent que la loi d'échange donnant le nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds est différente selon le cas considéré. On peut ainsi obtenir une amélioration du transfert de l'ordre de 5%.

Nomenclature

Nu nombre de Nusselt
 Re nombre de Reynolds
 Pr nombre de Prandtl
 r_T résistance thermique, $W K^{-1}$
 R résistance électrique, Ω
 L longueur du dépôt, m
 I intensité électrique, A

T température, K
 S surface d'échange, m^2

Symboles grecs

λ conductivité thermique, $W m^{-1}K^{-1}$
 ξ longueur non chauffée, m

1. Introduction

Les transferts de chaleur sont présents dans de nombreux procédés industriels (échangeurs de chaleur dans les centrales thermiques, dans les processus chimiques, etc.), mais aussi dans la vie quotidienne (chauffage, dispositifs électroniques...). L'amélioration de ces échanges et l'augmentation du rendement est un sujet très étudié mais qui nécessite encore des efforts de recherche importants. La compréhension des phénomènes physiques mis en jeu à un niveau fondamental est importante pour l'innovation au niveau des applications pratiques.

Nous nous sommes intéressés aux échanges thermiques entre un solide chauffé et un fluide réfrigérant en convection forcée, l'air dans notre cas, pour des vitesses usuelles, à nombre de Reynolds élevé. Une couche limite se développe sur la paroi de façon à ce que la vitesse du fluide s'adapte progressivement entre sa valeur nulle à la paroi et la valeur de la vitesse de l'écoulement extérieur. Cette couche fluide est l'étape limitante du processus de transfert, et plus elle est fine, plus l'échange est grand. Si l'on veut améliorer les échanges et en conséquence les rendements de beaucoup de procédés, on est obligé d'étudier la structure de la couche limite pour comprendre les phénomènes de transfert en proche paroi. Dans la plupart des situations courantes en ingénierie, la structure de la couche limite est celle d'une couche limite turbulente. La couche limite turbulente comporte deux zones, interne et externe. L'écoulement dans la zone interne est directement affecté par la paroi, ce qui n'est pas le cas dans la zone externe, même s'il existe une interaction entre les deux zones due au transport turbulent. La zone interne ou zone de paroi se divise aussi en trois parties : sous-couche

visqueuse, zone tampon et région logarithmique. Le fluide proche de la paroi est soumis à de fortes contraintes de cisaillement, ce qui génère une forte production turbulente. Ces structures turbulentes (« streaks », vortex en épingle à cheveux et autres) sont responsables du transport de la quantité de mouvement et de la température. La rugosité agit directement à l'endroit où les structures naissent et peut potentiellement modifier leur comportement de façon importante. Cependant, le seul effet de la rugosité généralement pris en compte dans la structure de la couche limite est le déplacement de la région logarithmique [1], bien que les études de Krogstad et Antonia entre 1992 et 2001 [2] montrent que l'effet s'étend aussi à des régions plus internes et affectent d'autres indicateurs statistiques de la turbulence de paroi.

La sous-couche visqueuse de la couche limite turbulente est une très fine couche de fluide à la paroi où les effets visqueux sont dominants. Cette région est considérée historiquement comme existant uniquement dans le cas de surfaces lisses [3], due à sa très petite taille, plus petite que celle de la rugosité utilisée généralement dans les travaux rapportés dans la littérature [4]. Dans le cas de surfaces rugueuses on parle plutôt de couche rugueuse. Cependant, la zone visqueuse constitue la région limitante dans les transferts d'énergie, puisque dans cette partie la chaleur est échangée en grande partie par diffusion. En effet, le nombre de Péclet, qui représente le rapport entre l'advection dans le fluide et la diffusion thermique ($Pe = U_{\infty} L / \alpha$) évolue d'une valeur nulle à la paroi jusque 3,5 approximativement à la limite de la sous-couche visqueuse. Améliorer les échanges dans la sous-couche visqueuse pourrait donc être important dans le rendement global du processus de transfert.

À l'heure actuelle des techniques nouvelles permettent de contrôler l'état de surface d'un solide jusqu'au nanomètre. On peut donc imaginer une surface d'une rugosité contrôlée suffisamment petite pour être complètement immergée dans la sous-couche visqueuse. D'un autre côté, la disposition ordonnée d'un certain motif rugueux nous semble plus cohérente qu'une simple distribution gaussienne, si l'on veut créer ou contrôler les structures qui peuvent apparaître dans cette région. Dans ce travail, on présente une première tentative dans cette voie de recherche, qui prétend montrer l'existence d'un effet positif de la rugosité pour le transfert thermique dans la sous-couche visqueuse. Pour accomplir cet objectif nous avons développé et mis en place un système de mesure adapté et spécifique. Dans la section 2 on décrit la géométrie des motifs rugueux ; dans la section 3 on explique la technique de mesure utilisée et dans la section 4 on montre les premiers résultats obtenus. On expose enfin quelques conclusions de ce travail.

2. Description des surfaces rugueuses.

Le choix des motifs rugueux utilisés a été basé dans les études existantes sur les riblets. Ces surfaces présentent des canaux longitudinaux qui permettent de diminuer le frottement entre 6 et 8% [5] et augmenter éventuellement le transfert de chaleur. Ces surfaces ont suscité un grand intérêt et elles ont été beaucoup étudiées. Le mécanisme de réduction du frottement a été expliqué par le guidage des structures turbulentes de la couche limite, les « streaks », en empêchant leur mouvement latéral. Cependant, l'effet de riblets dans le transfert de chaleur reste encore discuté. Choi retrouve une augmentation du nombre de Nusselt de 10% dans la région de diminution du frottement [6] mais selon Walsh l'augmentation de flux thermique n'apparaît que lorsque le frottement augmente [5]. D'autre part, les études numériques réalisées en 2003 par Stalio et Nobile [7] nient l'existence d'un effet bénéfique dans le transfert thermique de riblets longitudinaux. D'autres configurations ont été aussi étudiées, comme les riblets convergents, divergents, riblets triangulaires, carrés, tridimensionnels... La bibliographie est étendue, mais la taille de ces éléments rugueux est toujours de l'ordre de l'épaisseur de la couche limite, et non pas de la sous-couche visqueuse.

Nous avons travaillé avec quatre types de surfaces différentes, une lisse et trois rugueuses, avec une rugosité ordonnée et tridimensionnelle. On prépare un substrat céramique comportant deux bandes d'un alliage palladium argent, sérigraphiées de part et d'autre d'un carré de 2,42 cm de côté. Le support est une plaque de céramique, pour des raisons de stabilité thermique, d'une épaisseur de 0.6 mm. Dans la figure 1a on peut observer la géométrie de nos trois pavés rugueux qui vont être comparés à la surface lisse. Sur le substrat céramique, on dépose par sérigraphie des chevrons ordonnés en verre fritté selon trois motifs différents. Le premier (R1) est un chevron simple convergent, le deuxième (R2) se compose de trois chevrons parallèles, et le troisième (R3) a aussi trois chevrons qui sont décalés transversalement d'un pas. La rugosité d'une surface Ra est définie comme la valeur moyenne des pics et vallées sur toute la surface. Deux autres paramètres intéressants sont Rt , la hauteur maximale des pics et Rq , la valeur RMS. Pour nos surfaces, les mesures au profilomètre de contact donnent $Rt = 20 \mu\text{m}$, $Ra = 2.26 \mu\text{m}$ et $Rq = 7.43 \mu\text{m}$, identiques pour les trois types. La surface lisse (R0) utilisée pour comparer les résultats présente une rugosité gaussienne avec $Rt = 3.9 \mu\text{m}$, $Ra = 0.37 \mu\text{m}$ et $Rq = 0.71 \mu\text{m}$.

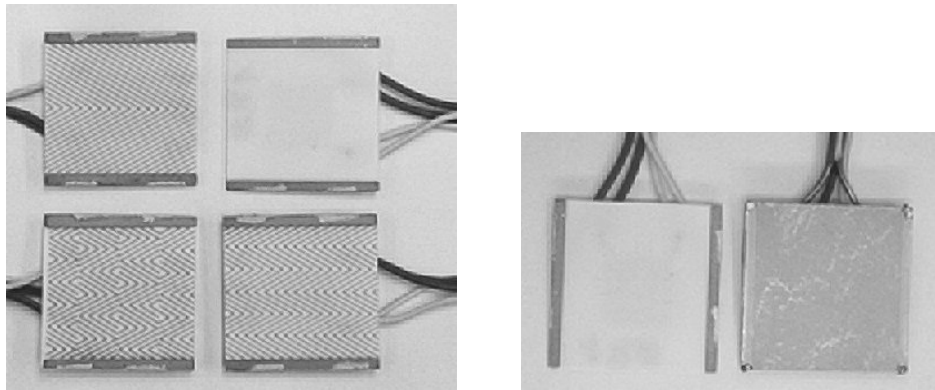


Figure 1 : a) vue de quatre surfaces rugueuses étudiées. De droite à gauche et de haut en bas : R0, R1, R2 et R3 ; b) vue du capteur de flux thermique lisse, avant et après évaporation d'une couche de platine. On distingue avant évaporation les deux bandes d'alliage palladium argent permettant une nappe de courant homogène dans la couche mince.

3. Principe de la mesure.

La technique de mesure utilisée est identique à celle des capteurs de frottement de paroi (« flush mounted hot film probe »), qui sont en fait des capteurs de flux thermique. Il s'agit d'un film métallique mince, dont la résistivité varie avec la température, qui est maintenu à résistance, donc à température constante par un conditionnement électronique. La mesure de la puissance dépensée pour effectuer cette opération dépend des fuites thermiques dans l'écoulement. Cependant, les capteurs commerciaux sont de surface très réduite, de l'ordre de $0,01 \text{ mm}^2$. On ne peut donc pas en tirer de conclusion sur le comportement global du flux thermique en présence d'un type de rugosité donné. Nous avons adapté ce type de technique pour la porter sur un type de surface rugueuse à étudier. Le résultat est une surface rugueuse qui est recouverte par un film métallique. Nous avons déposé sur le substrat céramique un film de platine d'une épaisseur de 1000 \AA par évaporation sous vide. Le dépôt est ensuite recuit 12 heures à une température de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ sous courant d'azote, pour assurer une bonne stabilité de sa résistance. On obtient des valeurs de résistance entre 5 et 10 Ohms. On dispose également d'une sonde de température Pt100 sérigraphiée sur l'autre face du support céramique. Les deux bandes latérales de palladium – argent, plus conductrices que le film de platine, jouent le rôle d'électrodes qui assurent une distribution homogène du courant à travers le dépôt et donc un chauffage homogène de la surface, ce qui a été testé à l'aide d'une caméra infrarouge Thermacam SC300. Les inhomogénéités de température observées sont inférieures à $0,5^\circ\text{C}$.

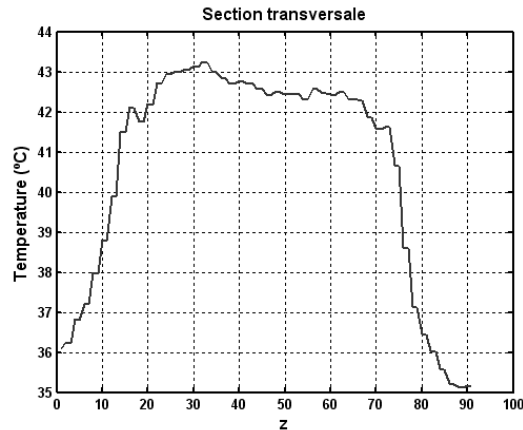


Figure 2 : distribution de la température de la couche métallique selon une section transversale. Profil obtenu à partir de thermographie infrarouge. Le dépôt est compris entre $z = 25$ et $z = 65$.

Les quatre dépôts sont placés dans un profil usiné en résine, en limitant les contacts thermiques plaque - profil par une isolation en laine de roche, placée dans une cavité au dessous de la plaque. Un soin particulier a été apporté à l'usinage du support en résine, avec un état de surface lisse et de cotes définies à $3 \mu\text{m}$ près. L'ensemble est placé dans la zone laminaire potentielle d'un jet libre. Le support profilé empêche le décollement de la couche limite mais fait transiter celle-ci vers la turbulence à partir du bord d'attaque. La figure 3 représente le schéma du support utilisé. La longueur non chauffée ξ entre le bord d'attaque du support et le dépôt est de 10 cm.

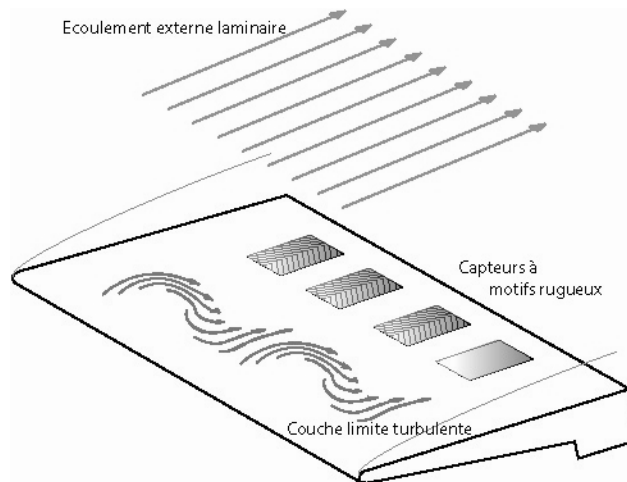


Figure 3 : Schéma du support profilé avec le capteur et de l'écoulement.

Les dépôts sont ensuite conditionnés par un circuit électronique qui maintient leur résistance à une valeur constante, avec une précision de $1 \text{ m}\Omega$. D'après les étalonnages de résistance en fonction de la température, ceci équivaut à maintenir la température moyenne à $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ près. La puissance fournie par le circuit pour maintenir la température de la surface constante se partage entre la conduction dans le support et la convection thermique dans l'écoulement. Pour connaître la température de la surface métallique on pourrait utiliser la loi d'étalonnage du dépôt, une fois mesurée sa résistance. Cependant, le coefficient de variation de la résistance avec la température est trop faible pour que cette mesure soit suffisamment précise. Si l'on calcule le nombre de Biot du substrat céramique, défini comme le rapport entre la résistance à la conduction dans le solide sur la résistance à la convection dans le fluide, on obtient typiquement $Bi = 0,08 \ll 1$. Ceci nous permet de considérer la température

de la sonde Pt100 sérigraphiée au dos de la plaque comme pratiquement la même que celle de la surface métallique.

4. Résultats

Nous avons mesuré l'évolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds défini comme $Re = U_{ext} \xi / \nu$, ou U_{ext} est la vitesse de l'écoulement externe qui varie entre 3 m/s et 40 m/s (mesurée avec un fil chaud, de précision 0,1 m/s). Chaque dépôt est chauffé à une température de l'ordre de 45°C, avec une puissance de l'ordre de 3 W. La température ambiante, du support et de l'écoulement est de 20°C, mesurée avec une thermistance à une précision de 0,1°C. On mesure la puissance dissipée dans le dépôt, nécessaire pour maintenir sa température constante, en fonction de la vitesse. Avec le circuit de conditionnement et de mesure utilisé on atteint une sensibilité sur le flux thermique de l'ordre de 0,3 mW. La précision dans la mesure du nombre de Nusselt est de $\pm 1\%$. A partir d'un bilan d'énergie en régime permanent on estime un nombre de Nusselt moyen ramené à la surface du capteur comme

$$Nu = \frac{RI^2 L}{\lambda S(T_d - T_0)} - \frac{L}{S r_t \lambda} - \varepsilon \sigma \frac{(T_d^4 - T_0^4) L}{(T_d - T_0) \lambda} \quad (1)$$

où T_d est la température du dépôt, T_0 la température ambiante. Les deux derniers termes de l'équation (1) sont inconnus, puisqu'on ignore la résistance thermique du support ainsi que l'émissivité ε du dépôt de platine. Pour connaître et éliminer ces termes il faut comparer les données expérimentales obtenues avec la loi classique pour le nombre de Nusselt d'une couche limite turbulente sur une plaque plane avec une longueur non chauffée [8]

$$Nu_x = \frac{0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}}{\left[1 - \left(\frac{\xi}{x}\right)^{9/10}\right]^{1/9}}, \quad (2)$$

Cette comparaison montre un décalage constant, que l'on interprète comme la prise en compte du rayonnement et conduction dans le support [9].

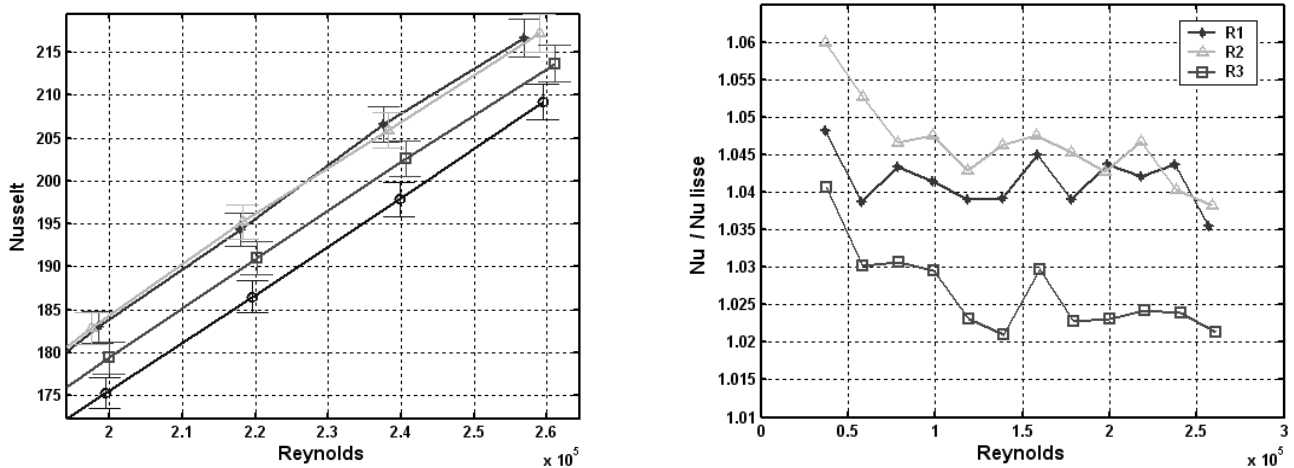


Figure 4 : a) nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds pour les quatre surfaces : R0 (\circ), R1 ($*$), R2 (Δ), R3 (\square). Les barres d'erreur expérimentales sont aussi représentées ; b) Comparaison relative des nombres de Nusselt de: R1 ($*$), R2 (Δ) et R3 (\square) par rapport au nombre de Nusselt de la surface lisse.

La figure 4 montre les résultats obtenus pour le transfert thermique d'une surface lisse et trois rugueuses avec des morphologies différentes. On peut observer une différence de comportement entre les quatre surfaces. La surface lisse R0 présente le nombre de Nusselt le plus bas, suivi de R3. On trouve ensuite R1 et R2 qui montrent le même comportement. Ces différences sont de l'ordre de 5% du nombre de Nusselt, supérieur aux des barres d'erreurs expérimentales (figure 4). Ces différences ne se justifient pas par l'augmentation de surface due aux motifs rugueux, qui est seulement de l'ordre de 0,8%. Les profils de couche limite réalisés confirment que pour cette gamme de vitesse notre rugosité est immergée dans la sous-couche visqueuse. Ceci montre l'existence d'un effet dans la sous-couche visqueuse de la couche limite turbulente, qui n'est pas négligeable et qui reste à comprendre. Le fait que R1 et R2 aient la même performance pourrait signifier que ce n'est pas la création de structures qui fait augmenter le transfert, mais peut-être leur guidage. Ceci expliquerait aussi que le motif plus désordonné de R3 ait un effet moins positif dans le transfert, puisqu'il aurait moins tendance à guider les structures de la couche limite.

5. Conclusion

Nous avons étudié l'effet d'une rugosité tridimensionnelle immergée dans la sous-couche visqueuse d'une couche limite turbulente dans le transfert thermique en convection forcée. La technique expérimentale utilisée a été adaptée à la mesure du transfert global sur une surface rugueuse. Trois motifs rugueux de même hauteur mais avec un motif tridimensionnel différent ont été étudiés et comparés au cas lisse. Nous avons observé des différences mesurables dans les lois de transfert entre les quatre surfaces, jusqu'au 5% pour le nombre de Nusselt. Ainsi, ce ne serait donc pas seulement la taille des éléments rugueux mais la morphologie globale de surface qui joue sur le transfert thermique. Une explication possible réside dans le guidage des structures turbulentes qui sont engendrées à la paroi.

Références

- [1] H. Schlichting, *Boundary layer theory*, McGraw Hill, New York, (1955).
- [2] R. A. Antonia & P.- Krogstad, Turbulence structure in boundary layers over different types of surface roughness, *Fluid Dynamics Research*, 28 (2001), 139 – 157.
- [3] J. O. Hinze, *Turbulence*, McGraw Hill, (1975).
- [4] J. Jiménez, Turbulent Flows over Rough Walls, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 36 (2004), 173 – 196.
- [5] M.J. Walsh & L. M. Weinstein, Drag and Heat-Transfer Characteristics of Small Longitudinally Ribbed Surfaces, *AIAA Journal.*, 17, 7 (1979), 770 – 771.
- [6] K.-S. Choi & D. M. Orchard, Turbulence management using riblets for heat and momentum transfer, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 15 (1997), 109 – 124.
- [7] E. Stalio & E. Nobile, Direct numerical simulation of heat transfer over riblets, *Int. Journal of Heat and Fluid Flow.*, 24 (2003), 356 – 371.
- [8] F. P. Incropera & D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley & Sons, (2002).
- [9] E. Sanz García *et al.*, Mesure de flux thermique convectif sur des surfaces rugueuses, *Congrès Français de Thermique, SFT 2006*, 14, tome 2, 989 – 994.

Remerciements

Les auteurs remercient A. Effernelli et M. Teissieux pour leur assistance technique, J.-L. Leclercq et P. Cremilleux du Laboratoire d'Electronique, Optoelectronique et Microsystèmes pour la mise à disposition des moyens de la plateforme microtechnologique du LEOM, le CETHIL pour le prêt de la camera I.R. Thermacam SC300 et la plateforme d'usinage de précision ISYMECA de l'E.C.L. pour la réalisation du support des capteurs. Ce travail a été soutenu par un financement BQR de l'E.C.L.