

Etude expérimentale des fluctuations de température pariétales dans le sillage d'un obstacle carré dans un canal hydraulique

Sébastien MENANTEAU^{1*}, Daniel BOUGEARD¹

Ecole des Mines de Douai, EI, F-59500 Douai, France
Univ. Lille Nord de France, F-59000 Lille, France
(auteur correspondant : menanteau@ensm-douai.fr)

Résumé – Notre travail porte sur l'étude des fluctuations de température localisées au niveau de la paroi, à l'aval d'un barreau carré placé dans une veine hydraulique. Le dispositif expérimental mis en place permet de chauffer le barreau et de visualiser par thermographie infrarouge le réchauffement local de la paroi impactée par le fluide en provenance du sillage instationnaire du barreau.

Nomenclature

D	Dimension de l'arête du barreau carré, m	U_c	Vitesse au centre du canal, $m.s^{-1}$
f	Fréquence, s^{-1}	Re_D	Nombre de Reynolds
T	Température, $^{\circ}C$	St	Nombre de Strouhal

Introduction

La région de sillage derrière un obstacle solide est un lieu de production de phénomènes intermittents favorisant le brassage du fluide circulant. L'écoulement à l'aval du solide est déstabilisé et une zone de battement naît. Le phénomène est connu sous le nom d'allée Von Karmàn. Ce type d'écoulement est caractérisé par un nombre de Strouhal constant, dépendant uniquement de la fréquence du phénomène, de la vitesse de l'écoulement et de la dimension de l'obstacle. Cette propriété est notamment intéressante lorsque l'on veut valider l'aptitude d'une méthode de mesure à détecter des phénomènes oscillants. Plusieurs études, numériques et expérimentales, ont été menées afin d'identifier le nombre de Strouhal selon différents cas de configurations de fluide autour d'obstacles solides avec des formes de section différentes. Dans le cas d'un fluide en circulation autour d'un barreau carré, Lyn et al. [1] déterminent expérimentalement un nombre de Strouhal de 0,13 pour un nombre de Reynolds de 21000. Pour des nombres de Reynolds plus faibles compris entre 550 et 3400, Ozgoren [2] trouve des nombres de Strouhal allant de 0,120 à 0,134. Numériquement, Saha et al. [3] obtiennent des valeurs de Strouhal aux alentours de 0,16 pour des nombres de Reynolds de 170-200. Pour différents modèles numériques URANS testés, Sun et al. [4] déterminent des nombres de Strouhal de 0,13 à 0,14 pour un nombre de Reynolds de 22000. Les différentes études s'accordent donc pour valider un nombre de Strouhal compris entre 0,12 et 0,14 dans le cas d'un fluide circulant autour d'un obstacle carré.

La présente configuration permet d'étudier un système dont la fréquence des fluctuations est connue théoriquement via le nombre de Strouhal. Dans ce cas, la connaissance de la vitesse d'écoulement et du nombre de Strouhal permettent de détecter une fréquence caractéristique théorique, qui doit être retrouvée par l'expérience. La méthode de détection utilisée est tout à fait originale au sens où elle utilise une technique de thermographie infrarouge permettant de détecter les fluctuations de température pariétale engendrée par un sillage instationnaire. Ce travail a essentiellement pour objectif de valider la thermographie infrarouge comme moyen de mesure et de détection des fluctuations thermiques pariétales sur des systèmes complexes.

1. Dispositif expérimental

La veine hydraulique fait 40mm x 24mm (largeur et hauteur resp.), avec un barreau carré de section $D=8\text{mm}$ centré dans le canal. De façon à assurer un profil de vitesse pleinement établi à l'amont de l'obstacle, une longueur d'établissement de 1200mm est placée en amont de l'obstacle. Un réservoir à l'amont et à l'aval de la veine hydraulique ont été disposés de manière à éviter d'éventuelles oscillations parasites provenant de la pompe de circulation. La pompe hydraulique assure dans la veine un débit constant régulé par un débitmètre. Le nombre de Reynolds de l'étude, basé sur la section du barreau et la vitesse débitante, est fixé à $Re_D=2640$. Le barreau carré disposé dans la veine est chauffé via un crayon cylindrique placé à l'intérieur, et délivrant un flux thermique constant régulé au moyen d'un variateur de tension. Le barreau en aluminium peut ainsi être chauffé jusqu'à 24 W/cm^2 . La Figure 1 présente le montage expérimental.

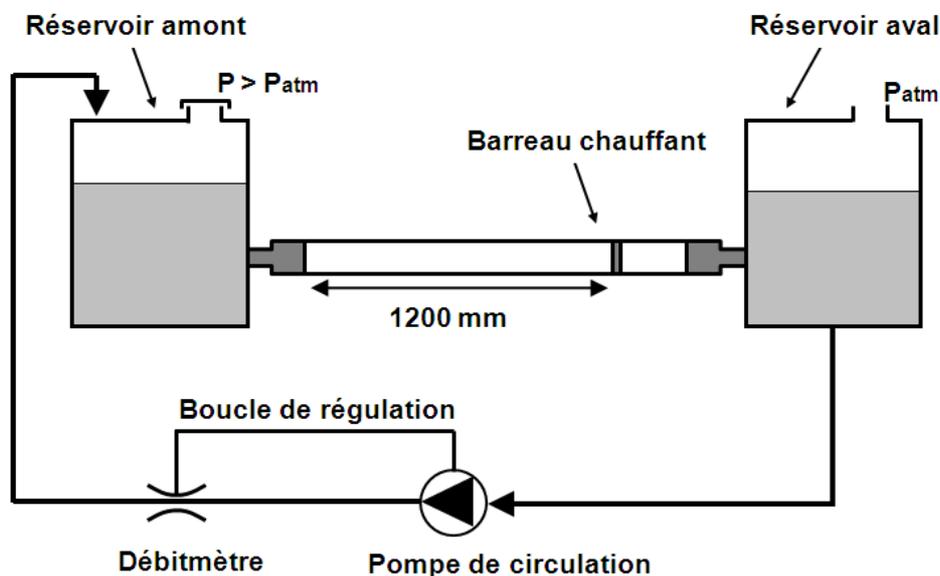


Figure 1 : schéma du banc expérimental

2. Présentation du dispositif de thermographie infrarouge

L'objectif de l'étude est de mesurer les fluctuations de température créées à la surface de la paroi interne d'un canal hydraulique. La thermographie infrarouge est une technique de mesure efficace car elle est non intrusive et permet de déterminer le champ de température d'une scène thermique visualisée par une caméra infrarouge [5].

Dans le but de détecter les températures pariétales, un hublot en Saphir, transparent dans la gamme de longueur d'onde de mesure de notre caméra infrarouge (Cedip FLIR, Titanium 550M) est utilisé. Un revêtement opaque spécifique est déposé à la surface interne du hublot de visualisation. De cette façon, le signal radiatif capté par la caméra infrarouge (IR), provient du signal émis par ce revêtement opaque et fortement émissif. Pour que cette méthode soit valide et avoir accès au champ de température à la paroi, il faut que le revêtement déposé soit opaque et émissif de façon à transmettre un signal radiatif proportionnel à sa température à la puissance 4 (loi de Stefan-Boltzmann). En outre, les propriétés thermiques et les caractéristiques dimensionnelles du dépôt doivent être choisies de manière à atténuer le moins possible les fluctuations de température dans le fluide. Afin de

répondre à ces critères, le facteur de réflexion du dépôt dans la gamme de longueur d'onde $[3\mu\text{m}; 5\mu\text{m}]$ est très faible, de l'ordre de 3% (données constructeur). Le matériau étant opaque (même avec une faible épaisseur), l'émissivité est très importante. Une mesure de celle-ci sur la gamme de longueur d'onde de la caméra par comparaison avec un corps gris étendu de référence (Polytec-PI/RMP SR80) est supérieure à 92%. En plus de ces bonnes propriétés radiatives, le revêtement est déposé sur une épaisseur très faible ($10\mu\text{m}\pm 4\mu\text{m}$ annoncé par le fabricant), ce qui permet de négliger les flux conductifs latéraux. Une simulation numérique de conduction 2D a été réalisée dans le but de vérifier l'aptitude du dépôt à transmettre un signal sinusoïdal de 10Hz et de 2°C d'amplitude, à partir des propriétés thermiques données par le fabricant. Les résultats montrent que l'amplitude du signal est retransmis à plus de 99,9% de l'autre côté du revêtement. La figure 2 illustre succinctement la mesure réalisée via le revêtement déposé. Le signal de température spatio-temporel créé par l'eau (noté (1) sur la figure 2) est transféré à travers le revêtement opaque sans être atténué (noté (2) sur la figure 2). Ce signal, à l'interface entre le revêtement et le hublot, est transmis à la caméra en passant à travers le hublot (noté (3) sur la figure 2).

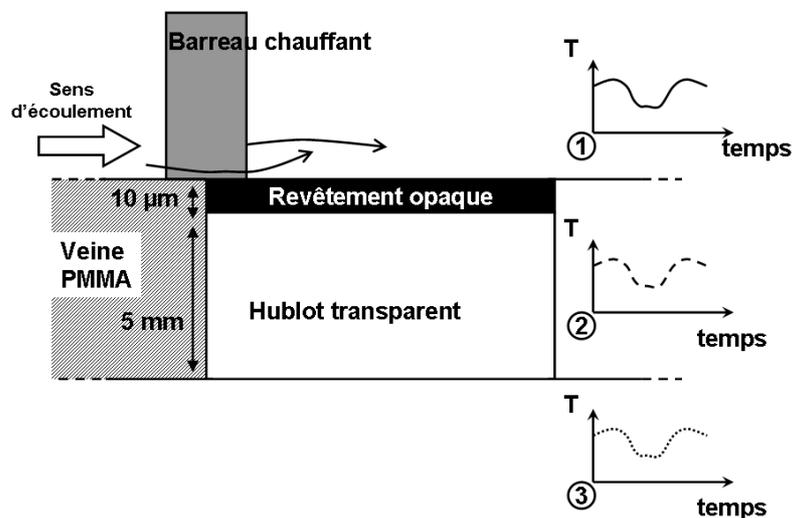


Figure 2 : Aptitude du revêtement déposé à la surface interne du hublot

De part ces propriétés radiatives et conductrices, le revêtement utilisé s'avère donc pertinent pour la mesure pariétale des fluctuations de température.

Méthode d'étalonnage

La thermographie infrarouge est une technique très sensible aux conditions radiatives qui environnent la scène thermique. Pour s'affranchir de ces conditions, l'étalonnage de la caméra infrarouge est réalisé en reproduisant l'essentiel des conditions de visualisation de l'expérience. La distance focale de la caméra est fixée de façon à avoir une résolution spatiale suffisante de la scène thermique. Un miroir réfléchissant dans l'infrarouge (surface plane plaquée or assurant une réflexion supérieure à 97% dans le domaine d'étude) est placé sur le trajet optique entre la caméra et le hublot de visualisation. Le miroir est isolé des réflexions parasites provenant du signal radiatif engendré par la température de la caméra par le dispositif (1) figure 3, une plaque rigide revêtue d'une peinture noire mat. La scène thermique est également préservée des réflexions liées à l'environnement par un cache occultant disposé autour du système de mesure (numéroté (2) sur la figure 3).

L'étalonnage de la caméra est effectué au moyen d'une plaque en aluminium dans laquelle circule un fluide régulé en température. La plaque est placée dans les mêmes conditions d'essai que la veine expérimentale : le hublot avec le revêtement est posé en contact sur la plaque afin d'être à la même température et le trajet optique, comprenant un miroir transparent aux infrarouges, est identique aux conditions d'essai de la veine (figure 3). Un bain thermostaté, stable à $\pm 0,01^\circ\text{C}$, régule la température du fluide. Les mesures de température sont faites au moyen d'une sonde PT100 étalonnée, précise à $0,01^\circ\text{C}$ près. La température est relevée à différents intervalles afin d'obtenir la courbe d'étalonnage de la figure 4, entre le signal numérique enregistré par la caméra et la température de la scène. Un polynôme d'ordre 2 est ensuite calé sur les mesures de l'essai afin d'interpoler les températures.

L'incertitude sur le champ moyen de température est d'environ $0,11^\circ\text{C}$. Elle provient en partie de l'utilisation du polynôme d'interpolation pour déterminer les valeurs de température entre deux points d'étalonnage. L'incertitude, donnée par le calcul de l'erreur quadratique moyenne en chaque point de mesure et la valeur du polynôme interpolé en ce point, est de $0,06^\circ\text{C}$. En outre, une autre source d'incertitude provient du bruit de mesure, donné par le NETD (noise equivalent temperature difference) de la caméra et correspondant à l'écart-type (σ). Considérant que 95% du signal est compris entre $\pm 2\sigma$, nous prenons 2 NETD pour caractériser le bruit, soit $0,05^\circ\text{C}$ à 25°C . L'incertitude globale s'obtient par sommation des incertitudes relatives. D'autre part, l'incertitude sur la loi d'étalonnage n'intervient pas dans l'incertitude du champ fluctuant de température car la différence faite entre le champ de température mesuré et le champ moyen compense l'erreur. Ainsi, l'incertitude du champ fluctuant tient compte uniquement de l'imprécision sur le bruit de mesure, soit $0,05^\circ\text{C}$.

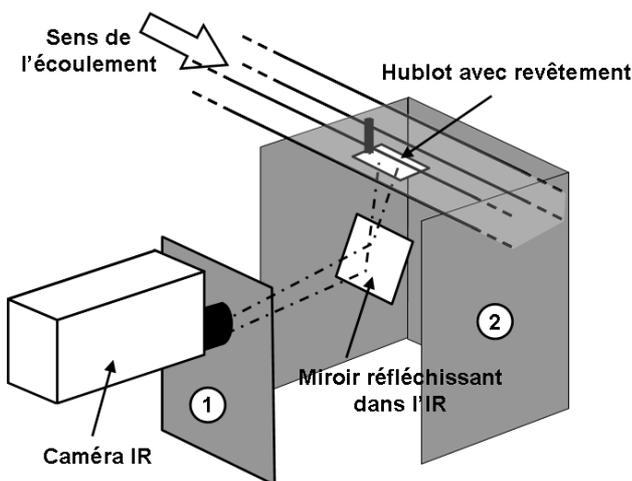


Figure 3 : Isolement de la scène thermique visualisée

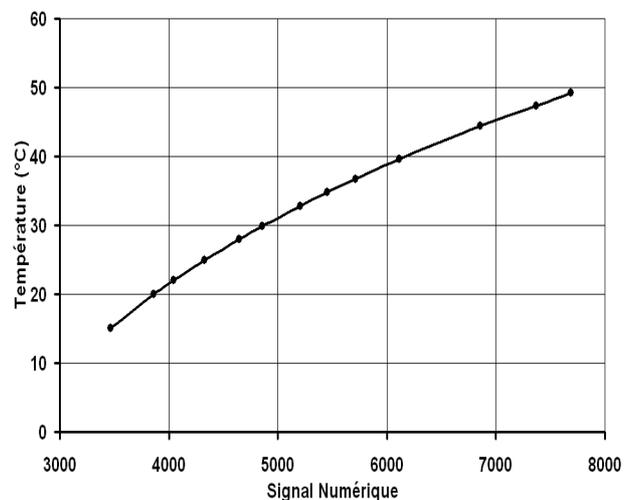


Figure 4 : Courbe d'étalonnage de la caméra infrarouge

3. Résultats

4.1. Profils moyens et fluctuants

Les profils moyens de température sont réalisés sur 10 minutes d'échantillonnage afin de s'assurer de la convergence statistique. Les figures 5 et 6 présentent respectivement les champs moyen et fluctuant des températures pariétales. Au nombre de Reynolds $Re_D=2640$, la

dissipation de la chaleur est rapide dans la zone de sillage. Les fluctuations sont localisées immédiatement à l'aval du barreau et au niveau des arêtes du barreau dans la zone de détachement. Le point indiqué sur les figures correspond à l'élément sur lequel est étudiée l'instationnarité (voir partie 4.2). Il correspond à une zone de forte fluctuation thermique dans laquelle la fréquence caractéristique a le plus de probabilité d'être détectée.

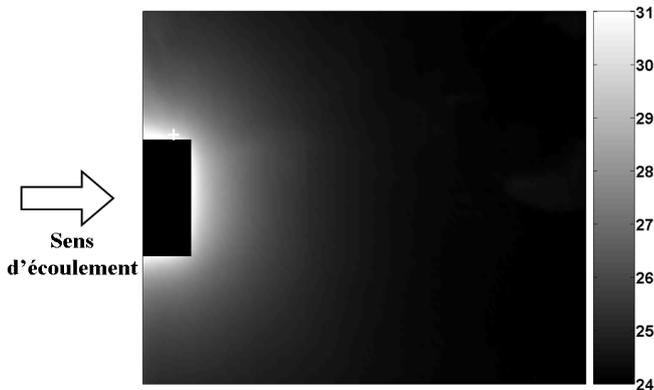


Figure 5 : Champ moyen de température pariétale

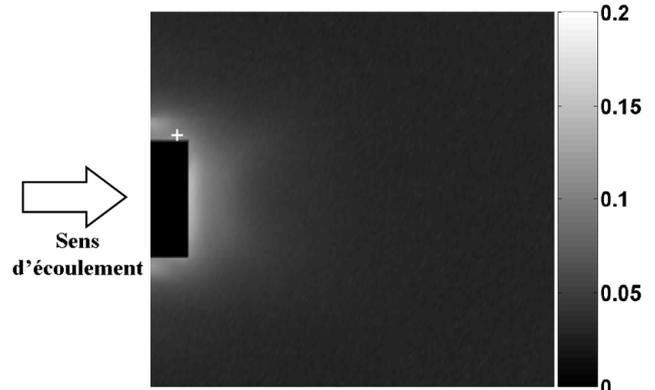


Figure 6 : Champ RMS de température pariétale

4.2. Etude du phénomène instationnaire

L'échantillonnage de la scène thermique est réalisé à 150 Hz au point représenté sur les figures 7 et 8. Afin d'obtenir le spectre de fréquence du signal et détecter la fréquence caractéristique, un traitement particulier est apporté au signal temporel. Le traitement du signal proposé consiste d'abord à retirer la composante continue du signal et supprimer une éventuelle dérive de température liée à un réchauffement progressif de l'écoulement moyen (régime thermique non stabilisé). Pour cela, un signal moyen, représenté par un polynôme, est soustrait au signal temporel. La figure 7 présente le signal de température enregistré par la caméra ainsi que le polynôme d'interpolation sur 4096 échantillons. La figure 8 présente le signal corrigé après soustraction du polynôme au signal initial.

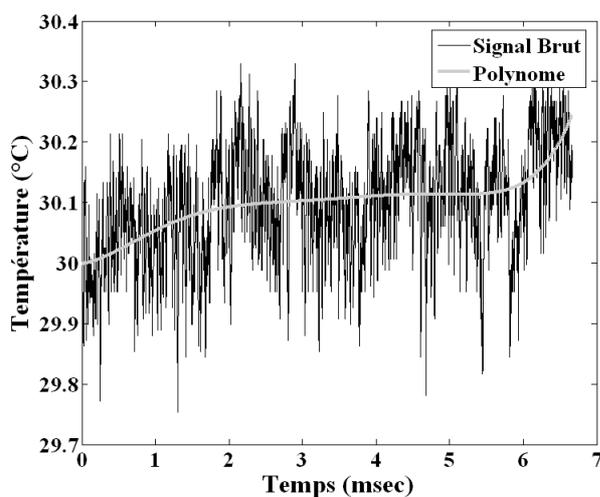


Figure 7 : Signal enregistré par la caméra et polynôme d'interpolation du signal

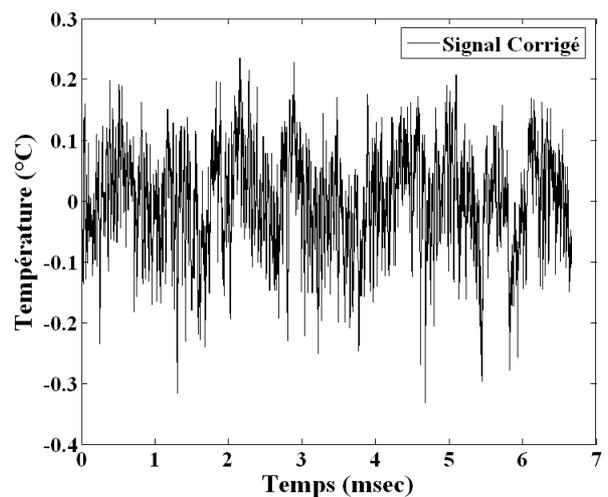


Figure 8 : Signal corrigé

Une transformée de Fourier discrète est ensuite appliquée au signal corrigé sur les 4096 échantillons. Sur la figure 9, le pic fréquentiel est nettement marqué. La fréquence caractéristique de battement est obtenue à 6,2 Hz. Le nombre de Strouhal, basé sur la fréquence de battement f , la dimension caractéristique du barreau D et la vitesse au centre du canal U_c , est alors de $St=0,137$. Ce résultat est tout à fait satisfaisant comparé aux valeurs de la littérature [1,2,3,4].

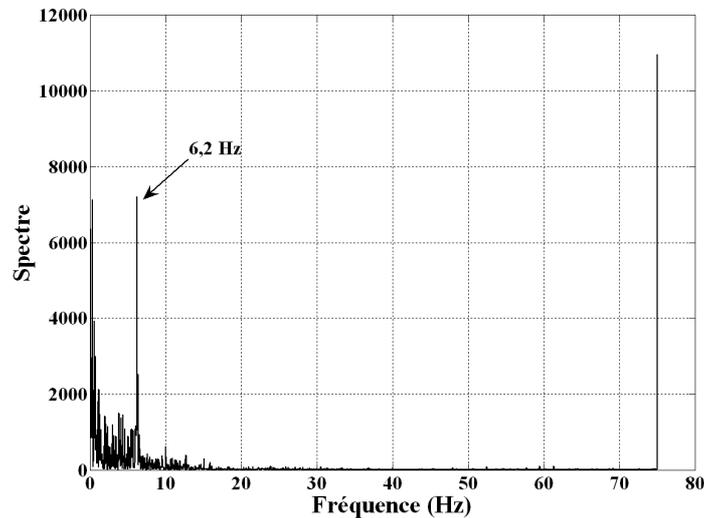


Figure 9 : Spectre de fréquence obtenu après traitement du signal

4. Conclusion

Cette étude a pour objectif de valider la mesure pariétale de fluctuation par thermographie infrarouge en retrouvant le nombre de Strouhal caractéristique d'un écoulement autour d'un obstacle carré à $Re_D = 2640$. À l'aval de l'obstacle, l'écoulement est déstabilisé et devient fortement turbulent. La chaleur est dissipée rapidement derrière l'obstacle et les fluctuations sont localisées très proche du barreau. Toutefois, la méthodologie utilisée pour la détection de fréquence a permis de déterminer un nombre de Strouhal de 0,137 qui correspond aux résultats de la littérature. Par conséquent, la détermination de champs moyens et fluctuants de température pariétale et la détection de fréquence par thermographie infrarouge est tout à fait réalisable et envisageable dans des cas de configurations plus complexes.

Référence

- [1] D.A. Lyn, S. Einav, W. Rodi, J-H. Park, A laser-Doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder, *J. Fluid Mech*, 304 (1995), 285-319.
- [2] M. Ozgoren, Flow structure in the downstream of square and circular cylinders, *Flow Measurement and Instrumentation*, 17 (2006), 225-235.
- [3] A.K. Saha, G. Biswas, K. Muralidhar, Three-dimensional study of flow past a square cylinder at low Reynolds numbers, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 24 (2003), 54-66.
- [4] H. Sun, X. Nicolas, Y. Sommerer, Caractérisation de modèles URANS pour la simulation des écoulements turbulents et des transferts thermiques autour d'un cylindre chauffé de section carrée, *Congrès Français de Thermique*, SFT 2008 (Toulouse, 3-6 Juin 2008), 79-83.
- [5] D. Pajani, Mesure par thermographie infrarouge, ADD editeur (1989).