

Etude expérimentale de la transition 2D-3D dans le sillage laminaire périodique d'un cylindre chauffé

Fabien Dumouchel* et Pierre Paranthoën**

* Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences

Université du Havre, BP 1137, 76063 Le Havre cedex

** Laboratoire de Thermodynamique, UMR 6614 C.N.R.S CORIA,

Université de Rouen, 76801 Saint Etienne du Rouvray cedex, France

(auteur correspondant : Paranthoen@coria.fr)

Résumé - Le but de ce travail est d'étudier expérimentalement dans l'air la transition 2D-3D dans le sillage d'un cylindre chauffé pour des nombres de Reynolds $80 < Re < 200$ et de faibles nombres de Richardson $0 < Ri < 0,01$. Il apparaît que cette transition se produit dans l'allée de Bénard-von Kármán chauffée à un nombre de Reynolds inférieur à celui déterminé dans une situation isotherme et pour des nombres de Richardson de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-3}$.

Nomenclature

a	diffusivité thermique, $m^2 s^{-1}$		<i>Symboles grecs</i>
d	diamètre du cylindre, m	β	dilatabilité du fluide, K^{-1}
f	fréquence des tourbillons, Hz	ν	viscosité cinématique, $m^2 s^{-1}$
g	accélération de la pesanteur, $m s^{-2}$		<i>indices et exposants</i>
l	longueur du cylindre, m	g	fluide
P	puissance électrique fournie, W	eff	effectif
ΔT	écart de température cylindre-fluide, K	w	cylindre
U_∞	vitesse longitudinale amont, $m s^{-1}$	∞	écoulement amont
T	Température, K		

1. Introduction

L'écoulement autour d'un cylindre chauffé est un problème important aussi bien du point de vue de la mécanique des fluides que de celui du transfert de chaleur. Le domaine des faibles nombres de Reynolds ($45 < Re = U_\infty d / \nu_g < 160$) où le sillage laminaire 2D se développe sous la forme d'une allée de tourbillons dite de Bénard-von Kármán a toujours présenté un grand intérêt en raison de son importance aussi bien pratique que théorique. Pour des nombres de Reynolds plus élevés, l'allée périodique 2D se transforme en un sillage 3D. Des centaines de publications ont été consacrées à l'étude de l'allée de tourbillons de Bénard-von Kármán dans le cas d'une situation isotherme [1]. De nombreux auteurs ont proposé des relations entre le nombre de Strouhal $St = fd / U_\infty$ et le nombre de Reynolds Re . Dans le cas où le cylindre est chauffé, les travaux sont plus rares et se sont souvent limités à proposer des relations entre le nombre de Nusselt et le nombre de Reynolds [2]. L'étude expérimentale du sillage chauffé dans cette gamme de nombres de Reynolds s'est heurtée à des difficultés techniques liées à la mesure délicate des champs de vitesse et de température dans un sillage de très faible

dimension. De plus, des travaux ont montré que même dans le cas où le transfert de chaleur entre le cylindre et l'écoulement s'effectue par convection forcée ($Ri = g\beta\Delta T d / U_\infty^2 \ll 1$), la chaleur n'est jamais un contaminant passif [3], [4]. En raison des changements de la viscosité et de la masse volumique du fluide avec la température, le chauffage entraîne soit une stabilisation du sillage dans les gaz ou une déstabilisation dans les liquides. Ce résultat nous a conduit à définir une température effective T_{eff} permettant de calculer un nombre de Reynolds effectif $Re_{eff} = U_\infty d / \nu_g(T_{eff})$ caractéristique du régime de l'écoulement du sillage chauffé [3]. Cette température effective s'écrit $T_{eff} = T_\infty + c\Delta T$ où $\Delta T = (T_w - T_\infty)$ et T_w et T_∞ sont respectivement les températures du cylindre et de l'écoulement amont. c est une constante comprise entre 0,24 et 0,28 dans l'air et de l'ordre de 0,97 dans l'eau, [5], [6], [7]. Cette valeur semble dépendre du nombre de Prandtl du fluide $Pr = \nu_g / a_g$ et est ainsi différente de la valeur 0,5 correspondant à la température de film quelquefois utilisée en anémométrie à fil chaud. Ce concept de température effective donne de bons résultats pour prévoir l'apparition ou la disparition des tourbillons derrière un cylindre chauffé ou calculer le nombre de Reynolds effectif dans la gamme $45 < Re_{eff} = U_\infty d / \nu_g < 100$. Pour des nombres de Reynolds plus élevés où apparaît déjà en situation isotherme une transition entre l'allée périodique 2D et le sillage 3D les résultats obtenus en situation chauffée sont moins probants et quelquefois contradictoires [6], [7]. Dans cette communication, nous présentons les premiers résultats d'une étude expérimentale consacrée au régime de l'écoulement dans le sillage d'un cylindre chauffé pour des nombres de Reynolds $80 < Re < 200$ et de faibles nombres de Richardson $0 < Ri < 0,01$.

2. Dispositif expérimental et Techniques de mesures

Dans ces expériences réalisées dans l'air, le cylindre est placé dans le coeur potentiel d'un jet plan rectangulaire horizontal de section initiale 15mmx150mm. Ce jet est alimenté par un ventilateur axial de vitesse variable. Le cylindre est un tube en inox de diamètre $D=1$ mm placé horizontalement au niveau de la buse de sortie. Ce tube est alimenté électriquement par une source de courant réglable entre 0 et 15A. Un thermocouple de type E est placé à l'intérieur du tube et permet de mesurer la différence de température ΔT entre le cylindre et le fluide amont. Les effets de gravité sont a priori faibles car le nombre de Richardson Ri reste toujours inférieur à 10^{-2} . Les extrémités de chaque tube sont munies de petits losanges inclinés afin de maintenir l'axe des tourbillons de la double allée parallèle à l'axe du cylindre [8]. Le rapport d'aspect est dans ces conditions de 90. Comme le montre la Figure 1, l'origine du système d'axes de référence est situé à l'arrière du cylindre. L'axe des x est orienté dans la direction de l'écoulement principal, l'axe des y est perpendiculaire à l'écoulement principal et au cylindre.

Des mesures instantanées de vitesse et de température ont été réalisées dans le sillage au moyen d'un fil en Pt de diamètre 1 μ m. Ce fil est utilisé successivement en fil froid et en fil chaud. La sonde de mesure est placée au point de coordonnées ($x/d=14$; $y/d=1$). En fonctionnement fil froid, la sonde est alimentée par un thermomètre à résistance construit au laboratoire et délivrant un courant constant $I_s=0,125$ mA. Cette faible valeur du courant est choisie pour que la mesure de la température ne soit pas contaminée par la vitesse. La Figure 2 montre les signaux donnés par un fil froid ($0,125$ mA $< I_s < 1$ mA) placé en aval du cylindre non chauffé. On peut noter que seuls les signaux obtenus avec $I_s=0,125$ mA ne sont pas sensibles aux fluctuations de vitesse créées par le passage des tourbillons. Quand cette sonde est utilisée en fil chaud, elle est reliée à un pont à température constante Dantec qui maintient une surchauffe de 0,8. La réponse en fréquence de cette sonde de température ou de vitesse est respectivement de 2-3 kHz et de 20kHz. Les signaux analogiques obtenus sont enregistrés et analysés par un appareil Photon.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Résultats sans chauffage

Les signaux de vitesse obtenus dans le sillage en absence de chauffage sont présentés sur la Figure 3. Les résultats montrent que l'allée est parfaitement périodique pour des nombres de Reynolds inférieurs à $Re=163$. Pour des nombres de Reynolds supérieurs à cette valeur, on constate qu'il existe des irrégularités dans les signaux qui traduisent la présence d'instabilités 3D.

3.2. Résultats avec chauffage

Les signaux de vitesse obtenus dans le sillage en présence du cylindre chauffé sont étudiés pour des nombres de Reynolds $Re=80$ et 140 calculés avec les propriétés physiques de l'écoulement amont. Pour ces nombres de Reynolds, les résultats du paragraphe précédent ont montré qu'en absence de chauffage, l'allée de tourbillons est parfaitement périodique. Les résultats obtenus dans le cas chauffé à $Re=80$ et pour différentes puissances de chauffage comprises entre 0 et 314W/m , sont présentés sur la Figure 4. Les résultats montrent que l'allée est parfaitement périodique pour des puissances de chauffage inférieures à 45W/m . Pour des valeurs plus importantes de P/l , on note l'apparition d'irrégularités sur le signal de vitesse juste avant qu'une valeur $P/l=314\text{W/m}$ soit suffisante pour faire disparaître les tourbillons. Les résultats obtenus dans le cas chauffé à $Re=140$ et pour différentes puissances de chauffage comprises entre 0 et 239W/m , sont présentés sur la Figure 5. Les signaux sont également périodiques et stables pour des puissances de chauffage inférieures à 104W/m . Pour des valeurs supérieures, les signaux de vitesse deviennent très instables. Sur la Figure 6 on constate également sur les signaux de température, une diminution de la fréquence et l'apparition d'instabilités quand la puissance de chauffage augmente.

4. Discussion

Ces résultats confirment l'influence du chauffage du cylindre sur l'écoulement de Bénard-von Kármán. Pour $Re=80$, cela se manifeste par une diminution de la fréquence des tourbillons de 190Hz à 135Hz quand le niveau de chauffage augmente de 0 à 250W/m . Pour $P/l=314\text{W/m}$, il est même possible de supprimer les tourbillons. L'élévation de température du cylindre $\Delta T=485\text{K}$ conduit bien à un nombre de Reynolds effectif voisin du nombre de Reynolds critique. Quand le signal devient instable juste avant cette suppression, le nombre de Richardson Ri est de l'ordre de $3 \cdot 10^{-3}$. Pour $Re=140$, on observe également une diminution de la fréquence des tourbillons de 415Hz à 305Hz lorsque la puissance augmente de 0 à 430W/m . Pour éviter d'endommager le cylindre, il n'est cependant pas possible d'atteindre le chauffage nécessaire pour arrêter l'allée de tourbillons. Dans ce cas, le signal devient également instable pour un nombre de Richardson Ri de l'ordre de $1,7 \cdot 10^{-3}$.

Ces résultats montrent que des effets 3D apparaissent plus précocement quand le cylindre est chauffé et que ces instabilités peuvent être présentes dès que le nombre de Richardson est de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-3}$. Ces effets 3D que nous allons maintenant étudier semblent liés à des effets de convection mixte présents juste derrière le cylindre. Ils seraient mieux caractérisés par un nombre de Richardson Ri^* de proche sillage défini avec la vitesse U_* et l'élévation de température ΔT^* de la zone de recirculation. En prenant $U_* = U_\infty / 20$ et $\Delta T^* = \Delta T / 4$, Ri^* serait de l'ordre de $0,25$ quand ces effets 3D apparaissent dans le sillage.

5. Conclusion

Dans ce travail, nous avons commencé à étudier expérimentalement dans l'air la transition 2D-3D dans le sillage d'un cylindre chauffé pour des nombres de Reynolds

$80 < Re < 200$ et de faibles nombres de Richardson $0 < Ri < 0.01$. Cette première étude montre que cette transition se produit dans l'allée de Bénard von Kármán chauffée à un nombre de Reynolds inférieur à celui déterminé dans une situation non chauffée dès que le nombre de Richardson est supérieur à $2,5 \cdot 10^{-3}$.

Références

- [1] M.M. Zdravkovich, *Flow around circular cylinders*, Oxford Science Publication (2005).
- [2] E.R.G. Eckert, E. Soehngen, *Trans.of the ASME*, 74, 343-347, (1952)
- [3] F.Dumouchel, J.C.Lecordier, P.Paranthoën, *Int.J.Heat Mass Transfer*, 41, 12, 1787-1794, (1998)
- [4] A.B. Ezersky, *Prikladnaya Mekhanika i Tekhn. Fisika*, 5, 56-62, (1990)
- [5] J.C.Lecordier, L.W.B.Browne, S.Le Masson, F.Dumouchel, P.Paranthoën, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 21, 227-237, (2000)
- [6] A. Wang, Z.Travnicek, K. Chia, *Phys. Fluids*, 12, 1401-1410, (2000)
- [7] T. Vit, M. Ren, Z.Travnicek, F. Marsik, C.C.M. Rindt, *Exp. Thermal and Fluid Sc.*, in press (2007)
- [8] G.Godard, Thèse Sciences Physiques, Rouen (2002)

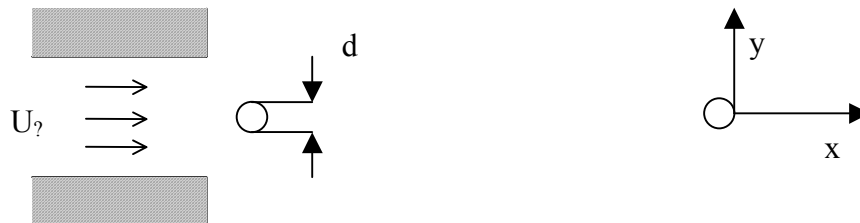


Figure 1 Dispositif expérimental et système de coordonnées.

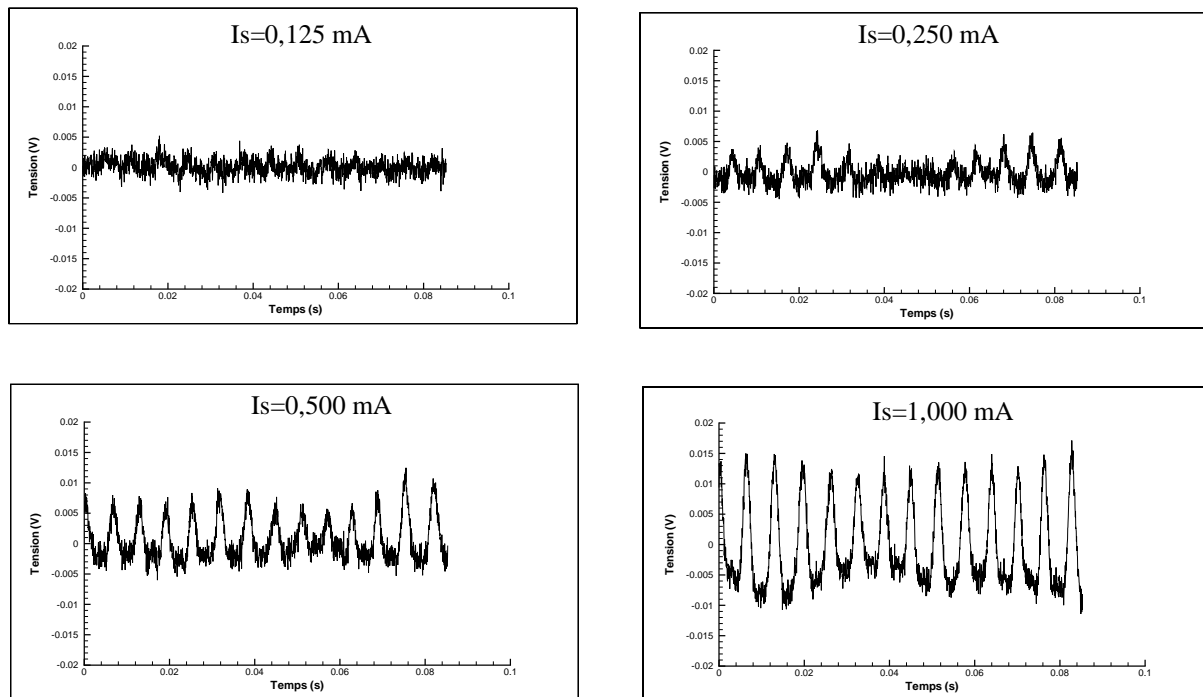


Figure 2 Influence de I_s sur la contamination du signal de température par la vitesse.

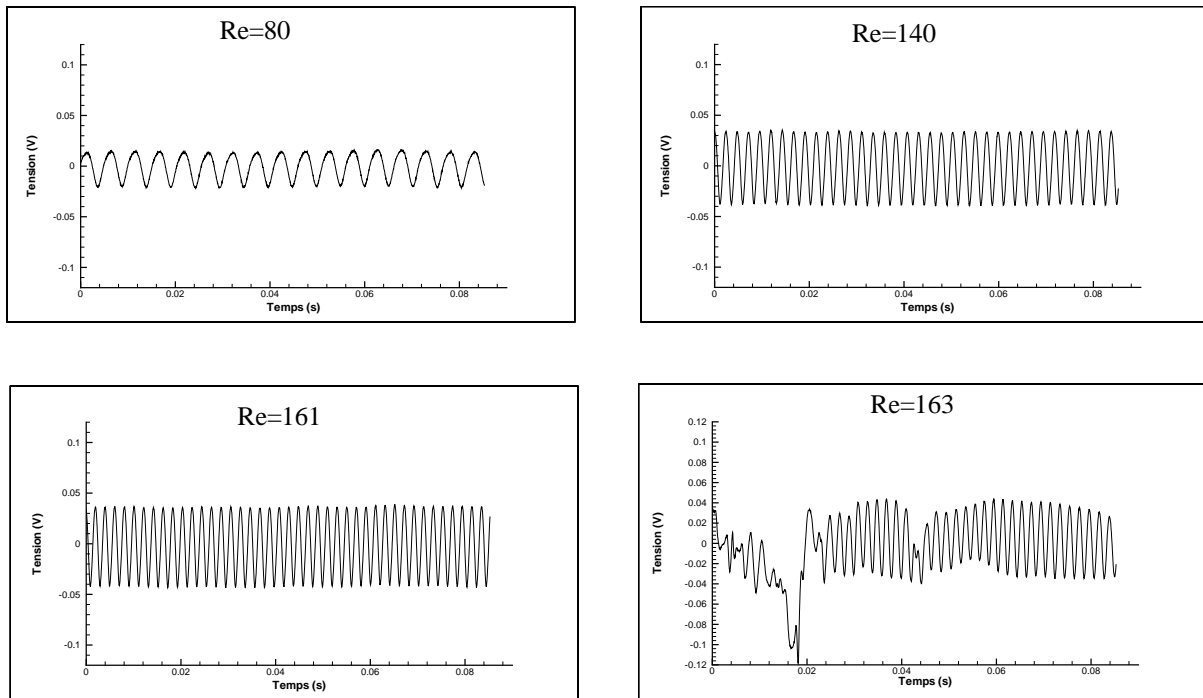


Figure 3 Signaux de vitesse dans le sillage isotherme à différents nombres de Reynolds.

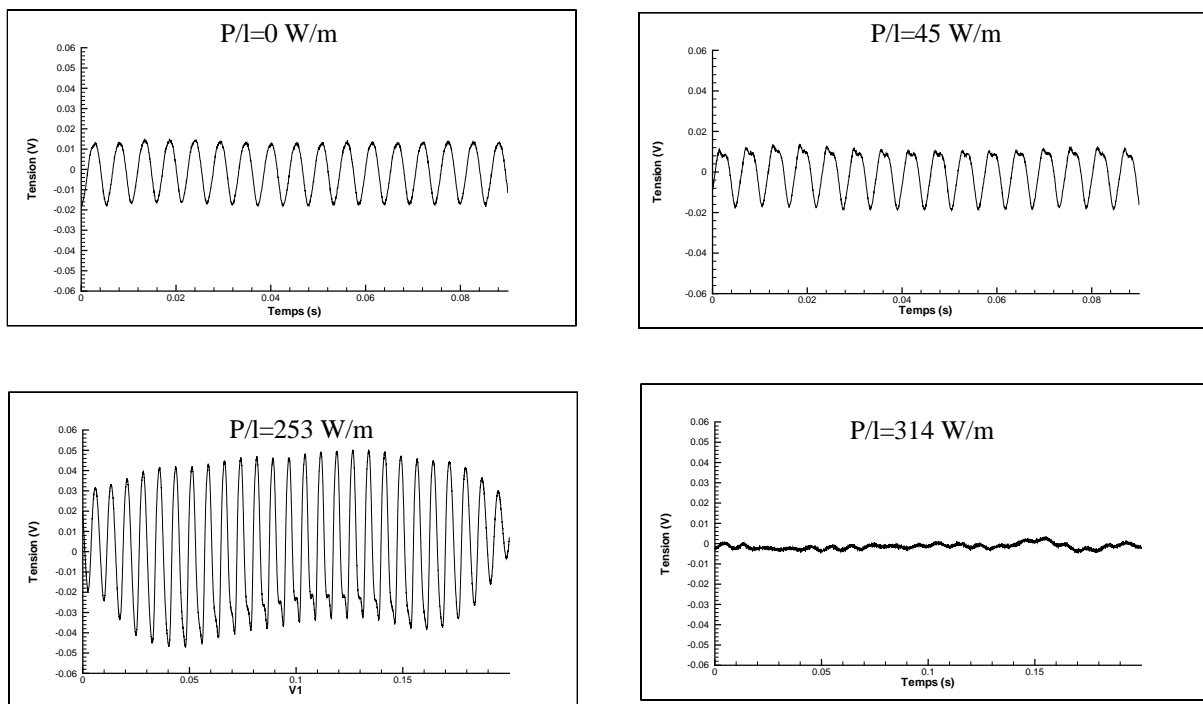


Figure 4 Signaux de vitesse à Re=80 à différentes puissances de chauffage.

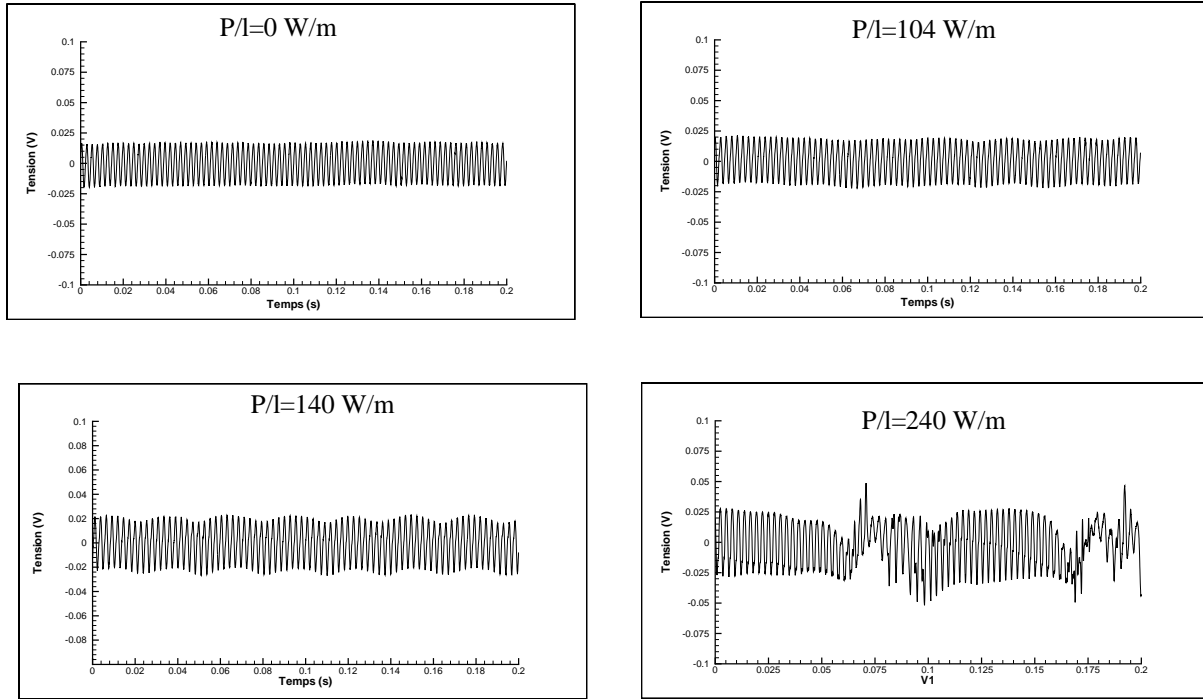


Figure 5 Signaux de vitesse à $Re=140$ à différentes puissances de chauffage

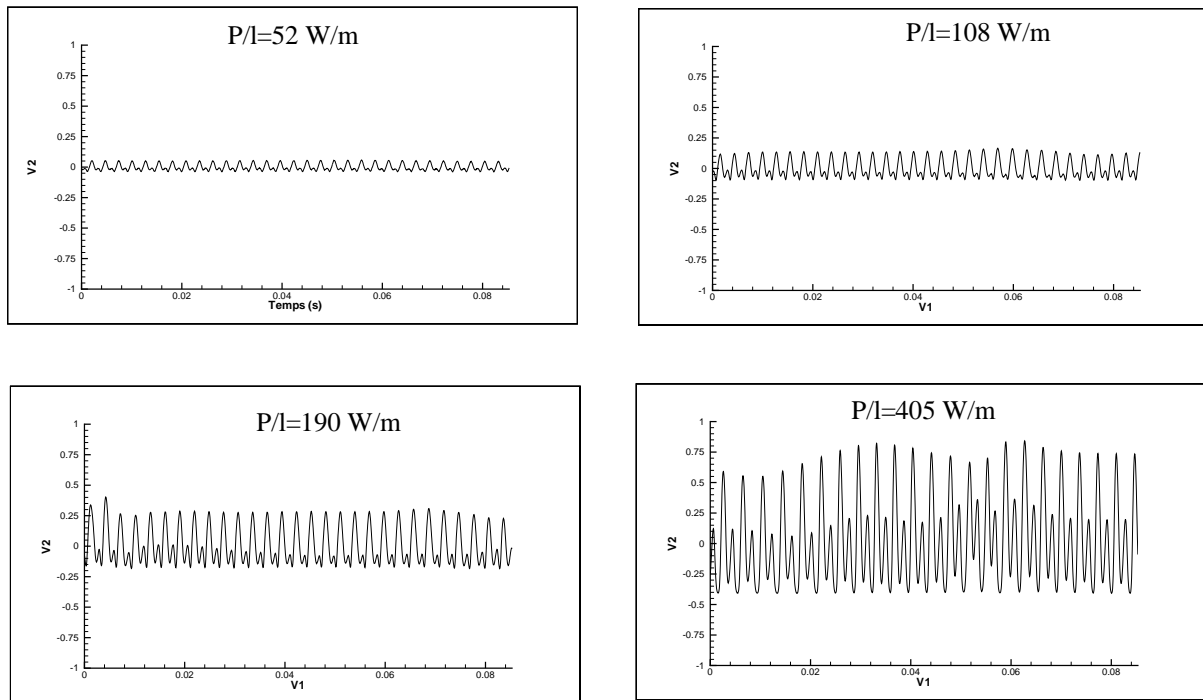


Figure 6 Signaux de température à $Re=140$ à différentes puissances de chauffage