

# Mise en oeuvre d'un dispositif d'acquisition simultanée de champs thermique et dynamique d'un écoulement de convection

Jean-François HENRY<sup>1\*</sup>, Catalin POPA<sup>2</sup>, Guillaume POLIDORI<sup>2</sup>, Stéphane FOHANNO<sup>2</sup>

Groupe de Recherche En Sciences Pour l'Ingénieur (GRESPI)

<sup>1</sup>Laboratoire de Thermophysique,

<sup>2</sup>Laboratoire de Thermomécanique,

Faculté des Sciences, 51687 Reims cedex 2

\*(auteur correspondant : [jf.henry@univ-reims.fr](mailto:jf.henry@univ-reims.fr))

**Résumé** - Ce travail concerne le développement d'un dispositif d'acquisition simultanée des champs de vitesse et de température d'écoulements complexes de convection, ceci afin d'éviter les incertitudes concernant la répétabilité des expériences, particulièrement en régime transitoire. Pour cela, une technique de visualisation par traceurs continus est combinée à la thermographie infrarouge. La faisabilité de la technique a été testée, en régime stationnaire, sur un écoulement de convection libre au voisinage d'une paroi chauffée surmontée d'obstacles.

**Mots clés:** *Convection thermique, Visualisation d'écoulement, Thermographie IR*

## Nomenclature

$e$  épaisseur lame de verre, m  
 $h$  coefficient d'échange,  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$   
 $k$  conductivité thermique,  $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$Ra^*$  nombre de Rayleigh modifié,  $= \frac{g\beta\phi x^4}{k\nu^2} \text{Pr}$

$x$  ordonnée, m

### *Symboles grecs*

$\varepsilon$  émissivité

$\phi$  densité de flux,  $\text{W.m}^{-2}$   
 $\theta$  écart de température, K

### *Indices et exposants*

*air* relatif à l'air  
*eau* relatif à l'eau  
*obs* obstacle  
*p* paroi  
*pn* peinture noire  
*v* verre

## 1. Introduction

De nombreuses études sont menées sur les écoulements de convection libre transitoire le long de surfaces verticales et en présence d'obstacles. Ces écoulements présentent un intérêt pour des applications industrielles telles que le refroidissement de composants électroniques ou le contrôle des ambiances en thermique du bâtiment [1,2]. En effet, la perturbation des couches limites, due à la présence des éléments de rugosité, peut affecter le transfert pariétal de chaleur de manière significative. Cependant, les modifications apportées au transfert thermique sont encore mal comprises en raison de la complexité de la structure dynamique de l'écoulement résultant de la perturbation [3,4]. Aussi, comme la convection naturelle résulte du couplage du mouvement du fluide avec son champ thermique, l'analyse d'un tel écoulement de convection naturelle exige l'application de méthodes expérimentales appropriées. Ces méthodes doivent permettre d'accéder simultanément aux champs de vitesse et de température afin d'éviter les incertitudes concernant la répétabilité des expériences, surtout lorsque celles-ci s'intéressent au régime transitoire [5,6]. Ces dernières années, on a pu observer un intérêt grandissant pour le développement de techniques d'acquisition simultanées de données thermiques et dynamiques dans les écoulements de convection [7,8].

L'objectif de la présente étude est donc de visualiser la structure dynamique de l'écoulement à l'aide de traceurs continus (technique PSV) et, dans le même temps, d'obtenir une cartographie des

températures pariétales à l'aide d'une technique non intrusive : la thermographie infrarouge. Bien que la thermographie infrarouge ait déjà été appliquée à la convection naturelle [8,9], les contraintes expérimentales comme l'opacité des matériaux aux longueurs d'onde IR ou le procédé de chauffage de la paroi amènent à considérer une installation spécifique où les caractéristiques de l'écoulement et la carte de températures sont obtenues simultanément des deux côtés de la paroi chauffée. L'originalité du dispositif réside donc dans son principe consistant à effectuer les visualisations d'écoulement sur la face avant de la paroi tandis que l'acquisition de la carte de températures par thermographie s'effectue sur la face arrière. Afin de tester les possibilités d'application de ce principe de mesure à l'étude de la convection thermique, une configuration particulière d'écoulement a été retenue. Il s'agit d'un écoulement de convection naturelle le long d'une paroi verticale surmontée d'obstacles tronconiques. La paroi, immergée dans de l'eau, est soumise à un chauffage uniforme générant ainsi un écoulement ascendant, de type couche limite, le long de la paroi et perturbé par la présence des tronçons.

## 2. Dispositif expérimental

Les expériences ont été menées dans une cuve remplie d'eau, de dimensions 50cm x 50cm x 100 cm, avec des parois en Plexiglas® de 20mm d'épaisseur (Figure 1).

Une ouverture carrée (30cm x 30cm) a été percée dans une des parois verticales et remplacée par une vitre en verre de 3mm d'épaisseur qui est utilisée comme paroi anisotherme délimitant le domaine de l'écoulement. La surface de la vitre, côté eau, est recouverte d'une fine couche de peinture noire (30µm d'épaisseur) ayant une émissivité  $\varepsilon = 0,96$  dans la gamme de longueurs d'onde de la caméra.

Le champ de température de la paroi est obtenu en utilisant une caméra thermique courte longueur d'onde (FLIR, SC1000) sensible au rayonnement dans la gamme de longueurs d'onde 3,0 – 5,0µm et dont le principe a précédemment été employé pour visualiser le transfert de chaleur avec le milieu ambiant [10]. L'écart de température minimal détectable dans la bande spectrale est inférieur à 0,1°C. La fréquence d'acquisition de la caméra a été maintenue constante à 50Hz et les images infrarouges ont été prises à une distance de 50cm de la vitre.

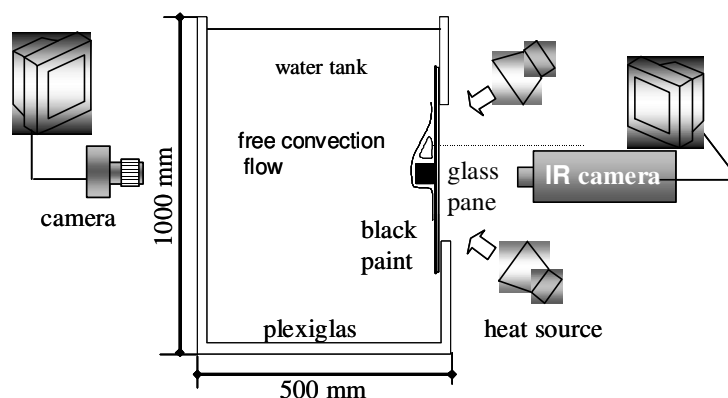


Figure 1 : *Dispositif expérimental*

Utilisant des matériaux et produits courants et bon marché pour ce test de faisabilité, l'une des principales difficultés rencontrée lors des expériences fut d'assurer une densité de flux de chaleur uniforme à la paroi. Afin d'atteindre cette condition limite thermique, quatre lampes halogènes, chacune délivrant une puissance électrique de 500W, ont été utilisées (Figure 2). Une attention particulière a été portée sur la façon de chauffer uniquement la fenêtre d'étude en recouvrant le reste de la paroi correspondante de la cuve avec un film d'aluminium.

Chaque lampe halogène est équipée d'une vitre de protection de 5mm d'épaisseur constituée d'un verre pour lequel l'analyse du spectre de transmittivité indique un filtrage quasi-complet du rayonnement infrarouge pour les longueurs d'onde supérieures à 2,8µm. De cette manière, les courtes longueurs d'onde restantes, inférieures à 2,8 µm, sont complètement transmises à travers la fenêtre en verre de 3mm d'épaisseur de la cuve sans la chauffer de sorte que la source de chaleur est confinée sur la fine couche de peinture noire côté eau (Figure 2).

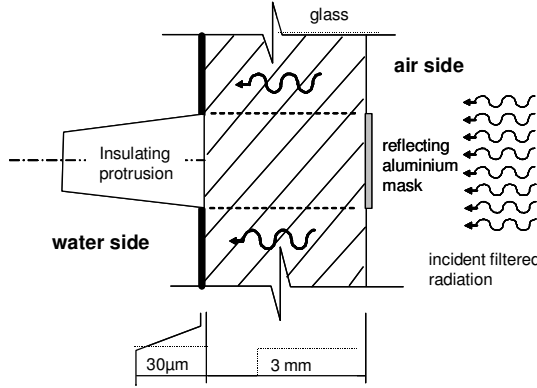


Figure 2 : Schéma du dispositif de chauffage

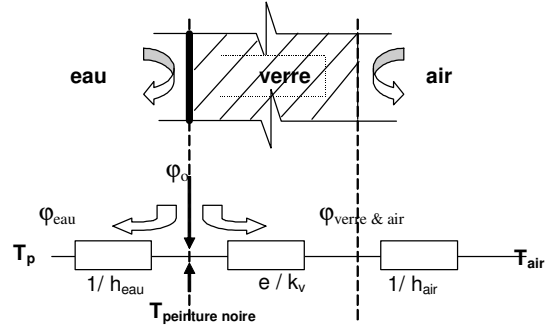


Figure 3 : Schéma électrique équivalent

### 3. Modélisation thermique et signal de la caméra

#### 3.1. Transfert de chaleur en régime permanent

En régime permanent et avec une géométrie unidimensionnelle, le système peut-être représenté comme sur la Figure 3. Le flux de chaleur surfacique,  $\varphi_{pn}$ , absorbé par la peinture noire, est subdivisé en deux composantes. La première,  $\varphi_{eau}$ , est dirigée vers l'eau et la seconde,  $\varphi_{air}$ , est dirigée vers l'air à travers l'épaisseur du verre.

$$\varphi_{pn} = \varphi_{eau} + \varphi_{air} \text{ avec } \varphi_{eau} = \frac{T_{pn} - T_{eau}}{1/h_{eau}} \text{ et } \varphi_{air} = \frac{T_{pn} - T_{air}}{e/k_v + 1/h_{air}} \quad (1)$$

Comme les températures de l'eau et de l'air sont identiques (à la température de la pièce), le rapport entre les flux transmis à l'eau et à l'air sont inversement proportionnels aux résistances thermiques rencontrées des deux côtés :

$$\frac{\varphi_{eau}}{\varphi_{air}} = \frac{e/k_v + 1/h_{air}}{1/h_{eau}} \quad (2)$$

Avec des valeurs usuelles des diverses grandeurs ( $k_v = 0,8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ,  $h_{air} = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , combinant convection libre et rayonnement et  $h_{eau} = 250 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ), le rapport est approximativement égal à 26. Ceci indique que plus de 96 % du flux est dissipé dans l'eau.

En outre, en raison de la résistance thermique élevée à l'interface verre/air comparée à la faible résistance thermique de l'épaisseur de verre ( $1/h_{air} \cong 0,1 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$  et  $e/k_v \cong 3,75 \times 10^{-3} \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$ ), le verre peut être considéré comme isotherme à travers son épaisseur et pratiquement à la même température que la peinture noire.

$$\varphi_{air} = \frac{T_{pn} - T_{air}}{e/k_v + 1/h_{air}} = \frac{T_{pn} - T_{v-air}}{e/k_v} = \frac{T_{v-air} - T_{air}}{1/h_{air}} \quad (3)$$

où  $T_{v-air}$  est la température de la surface du verre côté air.

$$\frac{T_{pn} - T_{v-air}}{T_{v-air} - T_{air}} = \frac{e/k_v}{1/h_{air}} \quad (4)$$

Afin d'accéder à la densité de flux convective, une image infrarouge du cas de la paroi nue a été prise pendant le régime thermique établi (Figure 4).

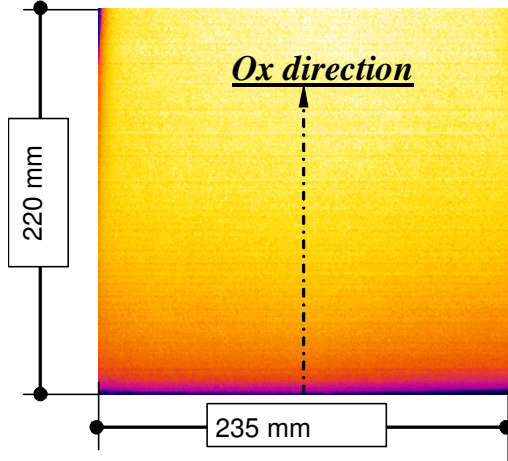


Figure 4: Image infrarouge de la paroi nue (lisse) chauffée

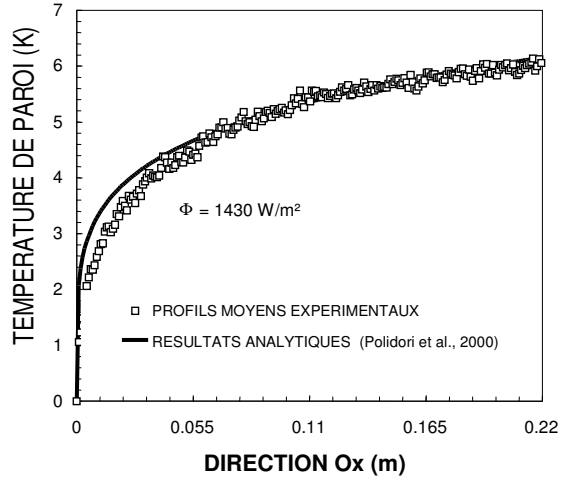


Figure 5: Profils des températures pariétales dans le cas de la paroi lisse

Les mesures des températures pariétales le long de l'axe vertical Ox (ligne médiane) dans le cas sans obstacle sont représentées sur la Figure 5 et comparées avec la solution analytique stationnaire de la distribution de température d'un écoulement de convection naturelle le long d'une paroi chauffée à flux constant ( $\theta_p \sim x^{0,2}$ ) déduite d'une méthode intégrale généralisée [11].

On observera que la distribution des températures mesurées présente quelques écarts avec la distribution théorique à l'origine des graphes. Ces écarts traduisent un manque d'homogénéité du flux de chaleur sur le bord inférieur de la vitre, peut être dû à des effets de bord inéluctablement présents pour de telles expériences. Néanmoins, la densité moyenne du flux de chaleur convectif a été estimée à  $1430 \text{ W/m}^2$  avec des variations d'environ 5% sur une zone visualisée d'environ  $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ . Dans ce cas, ceci donne un nombre de Rayleigh modifié ( $Ra^*$ ), basé sur la densité de flux moyenne et la hauteur de la zone chauffée, valant environ  $4,7 \times 10^{10}$ , ce qui indique un régime d'écoulement laminaire sur toute la paroi.

Puis, nous pouvons calculer les valeurs des différents flux de chaleur et la distribution de température à partir des équations (1), (2) et (3). Nous obtenons alors  $\varphi_{eau} = 1430 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $\varphi_{air} = 55,1 \text{ W.m}^{-2}$  et  $\varphi_{pn} = 1485,1 \text{ W.m}^{-2}$ , ainsi que  $T_{pn} = T_{eau} + 5,72^\circ\text{C}$  et  $T_{v-air} = T_{pn} - 0,2^\circ\text{C}$ .

Afin de détecter seulement la contribution de la peinture noire et dans l'objectif d'améliorations futures, il serait nécessaire d'utiliser des matériaux plus spécifiques tels que des verres totalement transparents aux infrarouges. Nous venons de montrer que ceci n'était pas fondamental pour notre configuration en régime thermique établi, mais le deviendra dans le cas d'études en régime transitoire.

#### 4. Technique de visualisation d'écoulement

Afin de générer des structures d'écoulement complexes, des obstacles tronqués ( $\varnothing 20/24\text{mm}$ ;  $L=30\text{mm}$ ), thermiquement passifs, ont été ajoutés sur la paroi chauffée selon une distribution arbitraire. Afin d'éviter l'échauffement de la base de chaque obstacle, et les modifications du transfert de chaleur qui en résulteraient, des disques d'aluminium ont été ajoutés sur la face arrière de la vitre (côté air) pour masquer les bases (Figure 2). De cette manière, il n'y a pas de chauffage direct de la base de ces obstacles peu conducteurs ( $k_{obs}=0,23 \text{ W/mK}$ ) de la chaleur. De plus, nous rappelons que seule la peinture noire est chauffée si bien que le problème peut, de façon réaliste, être considéré comme un problème de conduction 1D.

Afin de corrélérer simultanément le champ thermique avec le champ dynamique de l'écoulement de convection, la technique de visualisation (PSV Technique) a été utilisée. Pour cela, la méthode de précipitation électrolytique [12] a été étendue à la convection libre. Cette méthode consiste à générer une fumée blanche de sels métalliques, utilisés comme traceurs, provenant d'un fil d'étain servant d'anode et positionné sur la paroi en dessous des obstacles. L'intérieur de la cuve est illuminé par un éclairage volumique de faible intensité afin de s'assurer que celui-ci ne chauffe pas localement l'eau et la paroi. Les visualisations de l'écoulement à proximité de la surface de la paroi ont été obtenues à l'aide d'un appareil photo numérique (Minolta Dimage 7i) avec un temps d'exposition de 1/8s.

## 5. Résultats et discussions

Pour illustrer le type de résultats obtenus, la Figure 6 ci-dessous présente la distribution des températures pariétales (à gauche) et la structure de l'écoulement (à droite) au même instant ( $t=240s$  après le début du chauffage). Les visualisations soulignent les différents sillages de chaque obstacle et montrent comment ils interagissent avec l'obstacle en aval. On peut également observer la déviation du sillage en aval du dernier obstacle. En raison de la forme tronconique des obstacles et du faible gradient thermique dû au dispositif de chauffage, l'écoulement de fluide contourne en douceur et relativement lentement les obstacles. Il en résulte que le gradient de pression entre l'amont et l'aval des obstacles n'est pas suffisant pour que l'écoulement puisse se détacher de ceux-ci. En revanche, juste en aval des obstacles, le flux thermique imposé semble générer des forces de poussée d'Archimède suffisamment intenses pour permettre une aspiration de fluide plus froid provenant de l'extérieur de la couche limite en contournant les obstacles.

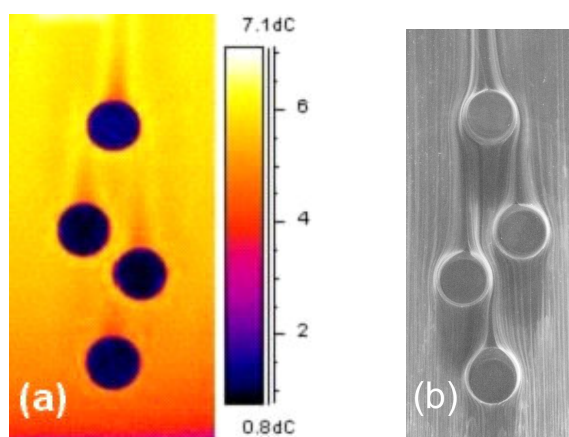


Figure 6 : Carte des gradients de températures (a) et visualisation du champ dynamique (b) obtenues simultanément à  $t=240s$ .

De son côté, la carte des températures pariétales (écarts avec une température de référence) indique que les sillages thermiques coïncident exactement avec les sillages dynamiques. On notera également la parfaite symétrie due à l'acquisition des images depuis la face avant (visualisation) et la face arrière (thermographie) de la vitre. En particulier, la déviation du sillage en aval du dernier obstacle est également mise en évidence. On peut observer que le fluide dans le proche sillage est plus froid que le fluide dans les régions extérieures, ce qui se traduit par une augmentation du coefficient d'échange local ( $h = \frac{\varphi_p}{\theta_p}$ , Figure 7). Cette observation est en accord avec celles de Polidori et Padet [4] qui ont également noté une amélioration du transfert de chaleur dans le proche sillage d'obstacles.

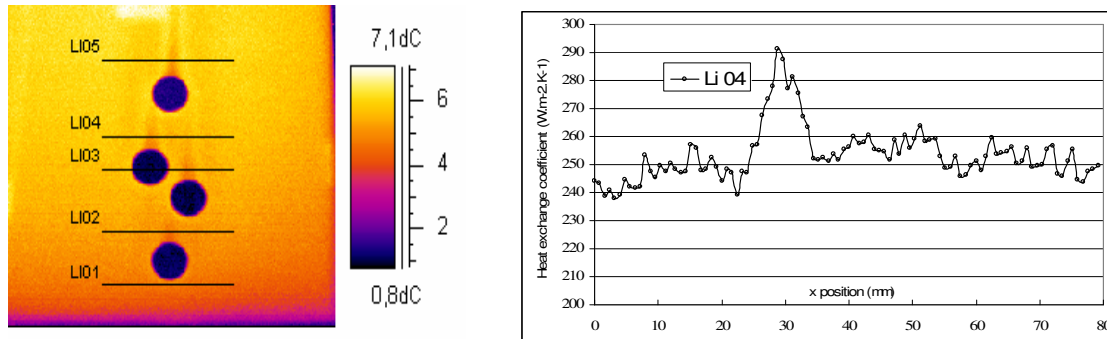


Figure 7 : Détermination des coefficients d'échange locaux. Evolution du coefficient d'échange sur une ligne horizontale traversant le sillage du 3<sup>ème</sup> obstacle.

## 6. Conclusion

En conclusion, nous avons développé un nouveau dispositif expérimental permettant d'obtenir simultanément des visualisations d'écoulement et des mesures thermiques non-intrusives. L'étude de faisabilité, appliquée à un écoulement de convection naturelle externe dans l'eau, s'est avérée satisfaisante. Le dispositif est perfectible, en particulier en ce qui concerne le procédé de chauffage qui devra permettre d'assurer des gradients plus élevés de températures à la paroi. Si, dans le cas présent, des données qualitatives sur la dynamique de l'écoulement ont été obtenues et utilisées à partir de la technique PSV, le dispositif permet également de fournir des informations quantitatives sur le mouvement du fluide comme celles déduites du suivi de traceurs discrets (Technique PTV) par tomographie laser. En outre, le caractère instantané des mesures dynamique et thermique réalisées montre l'adaptation du dispositif à l'étude de régimes transitoires.

## Références

- [1] Joshi Y, Willson T, Hazard SJ "An experimental study of natural convection from an array of heated protrusions on a vertical surface in water", *J. Electronic Packaging* **111** (1989) 121-128.
- [2] Burak VS, Volkov SV, Martynenko OG, Khrantsov PP, Shikh IA "Experimental study of free-convective flow on a vertical plate with a constant heat flux in the presence of one or more steps" *Int. J. Heat Mass Transfer* **38** (1995) 147- 154.
- [3] Shakerin S, Bohn M, Loehrke RI, "Natural convection in an enclosure with discrete roughness elements on a vertical heated wall". *Int. J. Heat Mass Transfer* **31** (1988) 1423-1430.
- [4] Polidori G; Padet J, "Transient free convection flow on a vertical surface with an array of large-scale roughness elements" *Exp Thermal Fluid Sci.* **27** (2003) 251-260.
- [5] Astarita T., Cardone G., Carlomagno G.M., Meola C., "A survey on infrared thermography for convective heat transfer measurements" *Optics & Laser Technology* **32** (2000) 593-610.
- [6] Carlomagno G.M., Nese F.G., Cardone G., Astarita T. "Thermo-fluid-dynamics of a complex fluid flow" *Infrared Physics & Technology*, 2004
- [7] Lemoine F; Antoine Y; Wolff M; Lebouche M "Simultaneous temperature and 2D velocity measurements in a turbulent heated jet using combined laser-induced fluorescence and LDA". *Exp Fluids* **26** (1999) 315- 323.
- [8] Volino RJ; Smith GB "Use of simultaneous IR temperature measurements and DPIV to investigate thermal plumes in a thick layer cooled from above". *Exp Fluids* **27** (1999) 70-78.
- [9] Wisniewski TS; Kowalewski TA; Rebow M "Application of infrared thermography in natural convection study." *Eurotherm 64 on Quantitative Infrared Thermography*, Reims, 2000, pp. 313-318.
- [10] Laloue P; l'Ecolier J; Dalarun P; Henry JF; Bissieux C "Application of modulated photothermal thermography to the determination of heat transfer coefficient profiles." *Eurotherm 71 on Visualization imaging and data analysis in convective heat and mass transfer*, Reims, 2002, pp. 229-234.
- [11] Polidori G; Mladin EC; de Lorenzo T « Extension de la méthode de Karman-Pohlhausen aux régimes transitoires de convection libre, pour  $Pr > 0.6$  ». *C.R. Acad. Sci. Paris, Sér. IIb* **314** (2000) 763-766.
- [12] Taneda S; Honji H; Tatsumo M "The electrolytic precipitation method of flow visualization." *Proc Int. Symp. on Flow Visualization*, Tokyo, 1977, pp. 133-138.