



**HAL**  
open science

## Micro-vélocimétrie laser Doppler réalisée en optique intégrée sur polymère

Luiz Poffo, Stéphane Gluck, Ronan Le Page, Jean-Marc Goujon, Nathalie Lorrain, Mohammed Guendouz

### ► To cite this version:

Luiz Poffo, Stéphane Gluck, Ronan Le Page, Jean-Marc Goujon, Nathalie Lorrain, et al.. Micro-vélocimétrie laser Doppler réalisée en optique intégrée sur polymère . 14ème Colloque international francophone sur les Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie / 16ème congrès français du club FLUVISU/SFO (CMOI-FLUVISU 2015), Nov 2015, Pleumeur-Bodou, France. hal-01234359

**HAL Id: hal-01234359**

**<https://hal.science/hal-01234359v1>**

Submitted on 24 Feb 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Micro-vélocimètre laser Doppler réalisé en optique intégrée sur polymère

L. Poffo, S. Gluck <sup>(1)</sup>, R. Le Page, J-M Goujon, N. Lorrain, M. Guendouz

CNRS, UMR Foton, Université de Rennes 1, Enssat, F-22305 Lannion, France

(1) A2 Photonic Sensors, c/o INPG-MINATEC, 3 Parvis Louis Néel BP 257- 38016 Grenoble

## 1. Introduction :

Le vélocimètre laser Doppler (LDV) est largement utilisé dans diverses applications : par exemple le contrôle de vitesse dans le processus de production de l'acier et du papier [1], la mesure de la turbulence dans les flux de combustion [2] et les mesures du débit sanguin [3]. Néanmoins, les vélocimètres laser Doppler conventionnels utilisant les lasers argon sont volumineux, assez complexes et difficiles à aligner lors de l'assemblage. Actuellement certaines applications nécessitent l'utilisation de vélocimètres miniaturisés comme pour la mesure de petits organismes dans le flux d'air dans les poumons en utilisant des endoscopes ainsi que la mesure du sang dans les artères et les veines à l'aide de cathéters [4]. Un défi de la LDV est donc la miniaturisation et la mesure dans des couches limites à proximité de parois (Cf. Figure 1) [5].

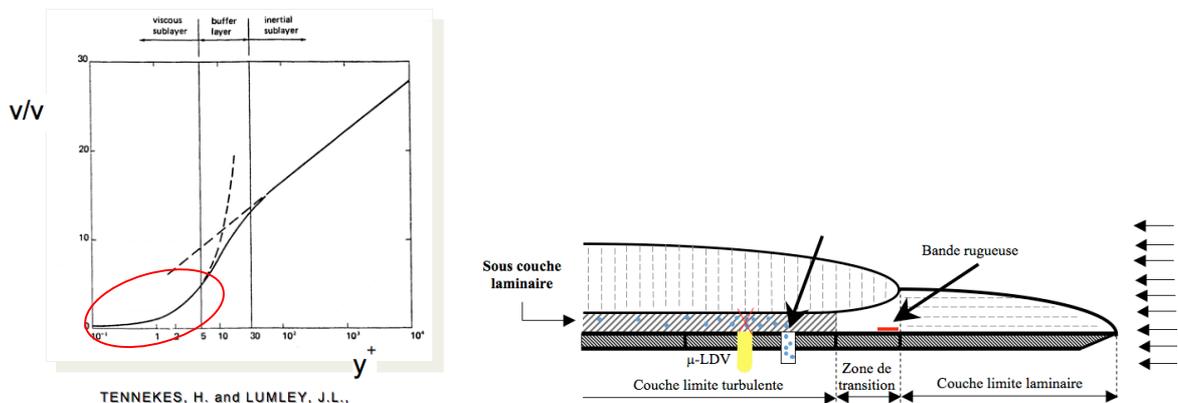


Figure 1 Sous couche laminaire à proximité de parois et schéma du banc de test du  $\mu$ -LDV utilisé dans la soufflerie.

La société « A2 Photonic Sensors » possède un micro-vélocimètre laser Doppler ( $\mu$ -LDV) réalisé par échange d'ions dans un substrat de verre. Cependant, ce système utilise pour la réception du signal une fibre optique multi-mode de  $105 \mu\text{m}$  de diamètre de cœur et d'ouverture numérique 0,22 collée au-dessus du composant avec un angle de  $20^\circ$  (Cf. Figure 2). Nous envisageons d'intégrer la réception à la structure du vélocimètre qui sera fabriqué en optique intégrée sur polymère. Cette technologie rend possible la réalisation de guides optiques superposés permettant ainsi d'obtenir une sonde monolithique et plus compacte. Cet article décrit la réalisation du  $\mu$ -LDV en polymère qui permettra par la suite d'incorporer le guide de réception dans la structure.

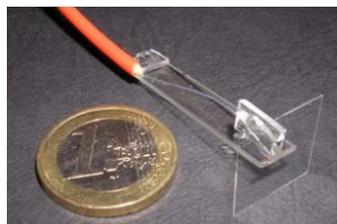


Figure 2 Le  $\mu$ -LDV avec la fibre de réception en angle.

## 2. Description générale du système

Visualisation et Traitement d'Images en Mécanique des Fluides

Pleumeur-Bodou/Lannion 2015

L'ensemble de la chaîne de mesure associée au  $\mu$ -LDV est illustré à la Figure 3. Une diode laser de 45 mW et de longueur d'onde 830 nm couplée à une fibre optique monomode sert de source lumineuse à la tête du capteur. Cette dernière, dont le fonctionnement sera décrit dans le paragraphe suivant, est installée en affleurement intérieur à la paroi de l'écoulement, de telle sorte qu'elle y soit intégrée mais non-intrusive. Le volume de mesure ainsi produit est localisé dans le fluide à une distance se situant entre 0 et 500  $\mu$ m de la face de sortie du capteur.



Figure 3 Chaîne de mesure associée au  $\mu$ -LDV.

La collection des bouffées Doppler est assurée en rétro-diffusion par un guide d'onde optique intégré au capteur. Les signaux optiques sont détectés par une photodiode avalanche avant d'être traités par une électronique adéquate (amplificateur faible bruit, filtres passe bande...) et un logiciel (Cf. Figure 4).

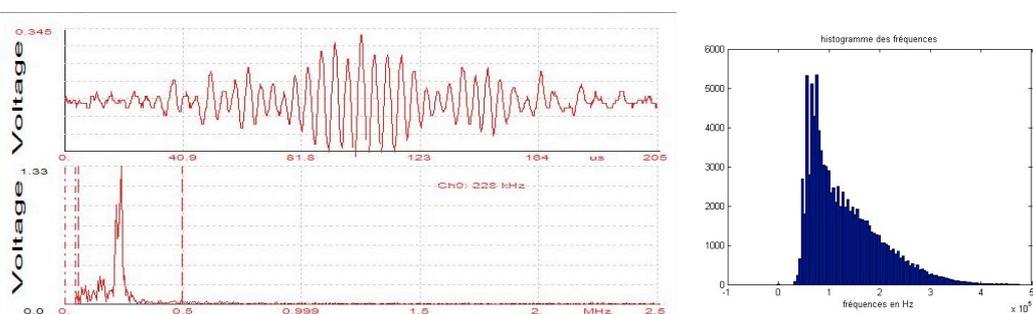


Figure 4 Exemple d'un signal (bouffée) préalablement filtré et l'histogramme des mesures en soufflerie.

### 3. Description de la tête interférométrique de mesure

La micro-technologie « d'optique intégrée » permet de fabriquer des fonctions optiques élémentaires telles que des guides d'ondes, des diviseurs, des croisements et des miroirs [6]. En combinant plusieurs d'entre elles, on obtient des circuits optiques complexes de très faibles dimensions et intégrés sur une « puce ». Le masque de la tête de mesure du  $\mu$ -LDV est composé d'un diviseur de faisceau optique (jonction Y), d'un collimateur (taper) ainsi que d'une optique de focalisation. La focalisation des faisceaux s'effectue grâce à l'intégration de miroirs convergents intégrés (Cf. Figure 5).

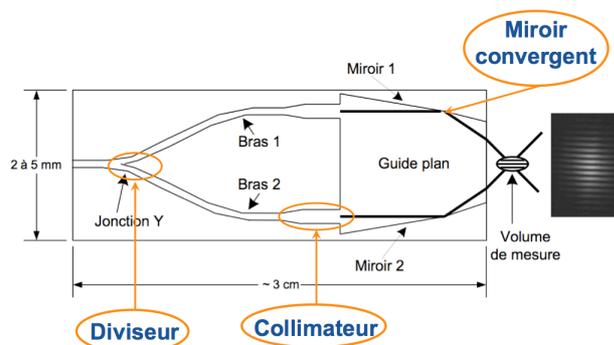


Figure 5 Schéma de la tête de mesure du  $\mu$ -LDV.

Les miroirs intégrés fonctionnent sur le même principe physique que celui du guidage optique : la réflexion totale interne. Les rayons lumineux arrivant à interface du guide ont des angles supérieurs à l'angle critique et sont donc entièrement réfléchis. La convergence des faisceaux est obtenue par la forme elliptique des miroirs : tous les rayons passant par un des foyers d'une ellipse passeront par le second foyer après réflexion. Le premier foyer d'un miroir elliptique est situé à la sortie d'un des bras de l'interféromètre, le second correspond à l'emplacement du volume de mesure. Cette convergence permet d'obtenir un volume de mesure petit avec des interférences réguliers.

Les dimensions des volumes de mesure ainsi réalisés sont comprises entre 15 et 80  $\mu\text{m}$  pour la profondeur, entre 12 et 22  $\mu\text{m}$  pour la largeur et entre 6 et 100  $\mu\text{m}$  pour la hauteur (Cf. Figure 6). Ces mesures sont prises à  $1/e^2$  de l'intensité maximale présente dans le volume de mesure. L'interfrange peut varier entre 0,5 et 2,75  $\mu\text{m}$  (Cf. Figure 7 et Table 1).

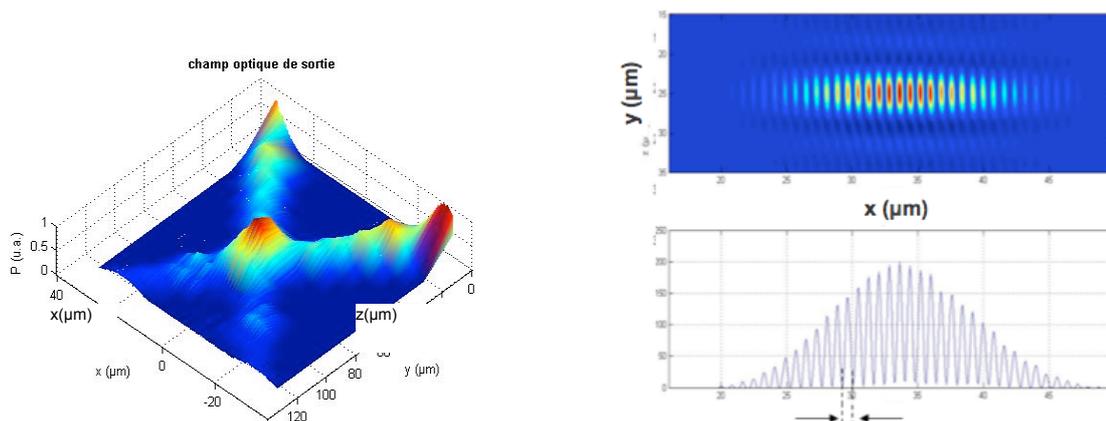


Figure 6 Exemple de volume de mesure obtenu pour  $\mu$ -LDV. X est la largeur, Y la hauteur et Z la profondeur,

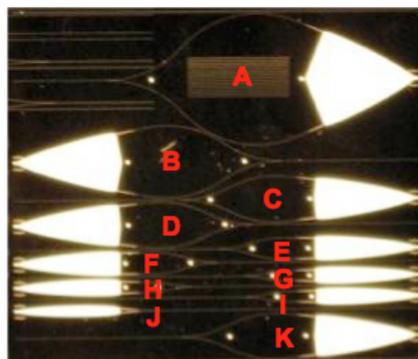


Figure 7 Les différentes configurations du vélocimètre

Table 1 Caractéristiques des différents vélocimètres développés.

	Interfrange	$\alpha$ ( $^\circ$ )	Distance	z ( $\mu\text{m}$ )	x ( $\mu\text{m}$ )
A	0,50 $\mu\text{m}$	56,3	30 $\mu\text{m}$	15	22
B	0,75 $\mu\text{m}$	33,7	35 $\mu\text{m}$	20	14
C	1,00 $\mu\text{m}$	24,6	55 $\mu\text{m}$	30	13
D	1,00 $\mu\text{m}$	24,6	70 $\mu\text{m}$	30	13
E	1,50 $\mu\text{m}$	16,1	55 $\mu\text{m}$	45	12
F	1,50 $\mu\text{m}$	16,1	75 $\mu\text{m}$	45	12
G	2,00 $\mu\text{m}$	12,0	55 $\mu\text{m}$	60	12
H	2,00 $\mu\text{m}$	12,0	75 $\mu\text{m}$	60	12
I	2,00 $\mu\text{m}$	12,0	150 $\mu\text{m}$	60	12
J	2,75 $\mu\text{m}$	8,76	150 $\mu\text{m}$	80	12

K	1,00 $\mu\text{m}$	24,6	70 $\mu\text{m}$	30	13
---	--------------------	------	------------------	----	----

Le vélocimètre ainsi obtenu est monolithique et ne nécessite aucune calibration ni alignement. Il peut facilement être déporté de la source et du détecteur. Le capteur est destiné à être monté affleurant à la paroi d'un écoulement, de telle sorte qu'elle y soit intégrée mais non-intrusive. La position du volume de mesure est connue précisément pour chaque  $\mu$ -LDV.

#### 4. Fabrication

Pour réaliser le  $\mu$ -LDV en polymère, nous utilisons une résine Epoxy photosensible, la SU-8, comme cœur et la NOA-65 (Norland) comme gaine inférieure et supérieure. Ce couple de polymères permet d'obtenir une différence d'indice de réfraction de 0,06. Pour obtenir une propagation monomode à une longueur d'onde de 830 nm, le cœur du guide a une dimension de  $1,0 \mu\text{m} \times 1,0 \mu\text{m}$ .

Les étapes du processus de fabrication sont schématisées dans la Figure 8. Ce processus qui se constitue de trois étapes de spin-coating et d'une étape de photolithographie suivies d'une gravure humide est très simple à obtenir et peu coûteux.

Toutes les solutions de polymères utilisées pendant le procédé de fabrication sont filtrées à  $0,2 \mu\text{m}$  avant chaque étape. Une couche de  $6 \mu\text{m}$  d'épaisseur de NOA-65 (600 g/L dans un solvant de THF) est déposée à la tournette sur un substrat de silicium de  $200 \mu\text{m}$  d'épaisseur et exposée aux UV. Afin de permettre l'adhérence de la SU-8, la couche de NOA-65 est soumise à un plasma d'oxygène. La couche de cœur déposée de  $1,0 \mu\text{m}$  d'épaisseur de SU8 est thermiquement traitée à hauteur de  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ . Les vélocimètres sont réalisés à travers un masque photolithographique chromé exposé aux UV puis développés. Une autre couche de  $6 \mu\text{m}$  d'épaisseur de NOA-65 est déposée et exposée aux UV pour réaliser la gaine supérieure.

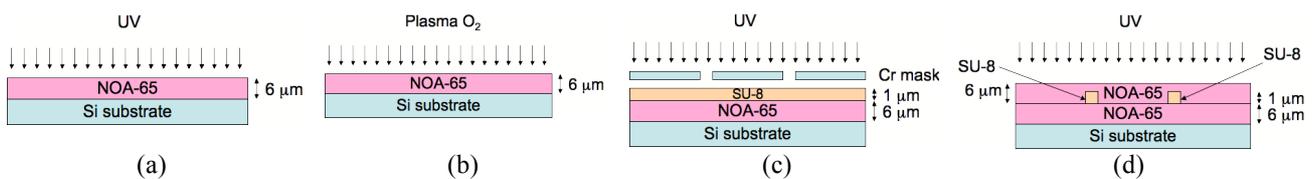


Figure 8 Processus de fabrication : a) spin coating de la NOA-65 (gaine inférieure) et réticulation par UV; b) plasma d'oxygène; c) spin coating du cœur en SU-8, photolithographie et gravure humide; d) gaine supérieure avec la NOA-65 et réticulation par UV.

Des observations par microscopie électronique à balayage (MEB) des vélocimètres ainsi réalisés sont effectuées afin de vérifier que les dimensions obtenues lors de la conception par photolithographie des vélocimètres sont bien celles souhaitées, notamment, la jonction Y, le collimateur et les miroirs convergents. De plus, les flancs de gravures obtenus sont satisfaisants (Cf. Figure 9).

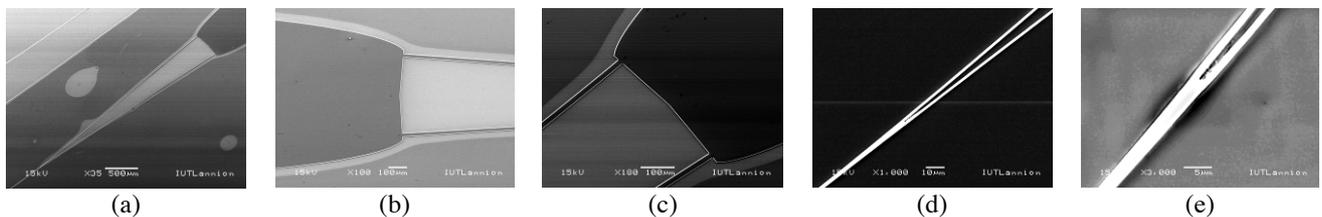
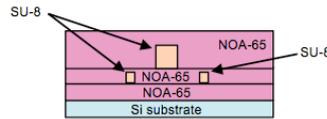


Figure 9. Images au microscope électronique à balayage : a) jonction Y, collimateur et morceaux du miroir convergent; b) et c) collimateur et morceaux du miroir convergent; d) et e) jonction Y.

#### 5. Le guide de réception intégrée

La technologie de l'optique intégrée sur polymère permet la réalisation des guides optiques superposés. Sur la dernière couche de NOA-65, qui est la gaine supérieure de la figure 2-d, nous réalisons un guide multimode de dimensions  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  avec la SU-8 (Cf. Figure 10) en

suivant le processus décrit dans le paragraphe 4 « **Fabrication** ». Ces dimensions permettent de récupérer le maximum de lumière rétro-diffusée par les particules qui passent par le volume de mesure. Ce guide a la forme d'un S pour faciliter la connexion des fibres d'émission et de réception en même temps par intermédiaire d'un V-groove. Une dernière couche de NOA-65 est posée sur l'ensemble pour protéger le tout.



*Figure 10 Processus de fabrication du guide de réception.*

Cette nouvelle tête optique est monolithique, plus compacte et plus facile à fabriquer. Nous attendons de meilleures performances du fait de la faible différence de hauteur entre le vélocimètre et le guide de réception intégré.

## 6. Conclusion

Cet article montre un nouveau vélocimètre laser Doppler fabriqué en polymères capable de mesurer la vitesse d'écoulement proche paroi. Ce processus simple et à bas coût facilitera l'intégration du guide de réception dans la puce. Les avantages de ce  $\mu$ -LDV sont nombreux comme : sa taille, qui lui permet d'être facilement intégré dans un système (écoulement, aérodynamique, prototypage, etc.), la mesure proche paroi unique par rapport aux LDVs commerciaux, la non nécessité d'alignement qui facilite sa entretien et son utilisation, etc... De nombreuses applications sont envisageables dans différents domaines comme dans la médecine, l'aéronautique, la micro-fluidique et les divers types de contrôle (bactéries, pollution, etc.).

## 7. Bibliographie

1. S. C. L. BOTCHERBY, « Lasers in Industry », London: Electrical–Electronic Press, vol. 2, pp. 19–27, 1971
2. E. P. HASSEL & S. LINOW, « Laser diagnostics for studies of turbulent combustion », Meas. Sci. Technol., pp. 37-57, 2000
3. B. L. PETRIG & C. E. RIVA, « Retinal laser Doppler velocimetry: towards its computer-assisted clinical use », Appl. Opt., vol. 27, pp. 1126-34, 1988
4. M. H. KOELINK et al, « Fiber-coupled self-mixing diode-laser Doppler velocimeter: technical aspects and flow velocity profile disturbances in water and blood flow », Appl. Opt., vol. 33, pp. 5628-41, 1994
5. H. TENNEKES & J. L. LUMLEY, « A first course in turbulence, MIT Press, 1974
6. L. POFFO et al, « Improvement of a glass integrated optical displacement sensor interferometer using acousto-optic effect », Meas. Sci. Technol., 16, 1341-1348, 2005