

# A scanning approach for three dimensional velocity determination at the micro-scale

D. Mutschler<sup>1</sup>, A. Deplanche<sup>1</sup>, P. Valiorgue<sup>1</sup>, H. Ben Hadid<sup>1</sup>, S. Martinez<sup>1</sup>, R. Hassaini<sup>1</sup>,  
S. Simoëns<sup>1</sup>

1. Université Lyon, Université Lyon I, Ecole centrale de Lyon, INSA Lyon, Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, UMR CNRS 5509, 36, avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully, France. dimitri.mutschler@univ-lyon1.fr

## Résumé :

Un dispositif mécanique original permettant de mettre en oeuvre des méthodes de vélocimétrie par image de particules de type scanning sur des profondeurs allant jusqu'à un millimètre est présenté.

**Mots clés :** *micro-PIV, scanning, microfluidique*

## 1 Introduction

La description expérimentale des structures d'un écoulement fluide reste encore aujourd'hui un défi difficile car celle-ci peuvent être tridimensionnelle et instationnaire. Les techniques Doppler [1] et la méthode de Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) représentent les deux familles majeures de techniques expérimentales non-intrusives utilisées pour quantifier les structures des écoulements. La PIV est une méthode de mesure optique non-intrusive permettant de déterminer la vitesse d'un écoulement. Le principe de base de la PIV classique décrit dans [2] peut-être résumé par les étapes qui suivent :

- Le fluide estensemencé de petites particules qui n'affectent pas et qui suivent l'écoulement étudié. Ces particules sont nommées "traceurs".
- Une source lumineuse illumine les traceurs.
- Leurs positions sont enregistrées sur deux images prises entre deux instants successifs séparés d'un temps  $\Delta t$ .
- Le déplacement  $\Delta x$  de particules entre les deux instants est ensuite déterminé par corrélation croisée de zones des images. La vitesse est ensuite approximée par  $v \approx \Delta x / \Delta t$ .

La vitesse d'acquisition des images, la taille des traceurs et l'épaisseur du plan de mesure jouent un rôle primordial sur la précision du champ de vitesse mesuré par PIV. De nos jours la méthode de PIV a été fortement développée en raison de ses multiples applications à la fois industrielles et fondamentales. Schröder [3] propose une revue détaillée des innovations en matière de PIV. La PIV

est une des rares méthodes non-intrusive qui permette de déterminer toutes les composantes de la vitesse. Il est possible de répertorier plusieurs techniques utilisant la PIV permettant d'obtenir les trois composantes de la vitesse en trois dimensions.

La première est appelée la PIV holographique (HPIV), elle combine deux approches de mesure expérimentales différentes : l'holographie et la PIV classique. L'holographie qui est décrite dans [4] permet de remonter à la position en trois dimensions d'une particule à partir de l'amplitude et la phase de l'onde lumineuse émise par le traceur. Le principe est le suivant, la position en trois dimensions des traceurs est obtenue entre deux instants proches par holographie puis le déplacement est déterminé par corrélation croisée tridimensionnelle. Les algorithmes de corrélation tridimensionnels peuvent coûter cher en temps de calcul mais donne directement les trois composantes de la vitesse.

La deuxième démarche expérimentales permettant de caractériser les trois composantes de la vitesse est la PIV tomographique (Tomo-PIV)[5]. La Tomo-PIV consiste à éclairer le volume d'un écoulementensemencé de traceurs puis de réaliser des enregistrements simultanés d'images prises avec des angles différents. Le déplacement tridimensionnel peut être reconstruit à partir des projections obtenues dans chaque plan en utilisant un algorithme MART. Ce procédé expérimental à l'avantage de mesurer la position des particules simultanément dans plusieurs sections ce qui lui donne la capacité de réaliser des mesures à fort Reynolds. Cependant, les algorithmes MART ont un coût de calcul élevé.

La dernière méthode présentée est la méthode dite du scanning qui consiste à reconstituer les trois composantes de la vitesse à partir de mesures en deux dimensions. Le principe de cette méthode qui est décrit dans [6] peut se résumer de la façon suivante : deux composantes de la vitesse sont déterminées en utilisant une méthode de PIV classique dans plusieurs sections parallèles de l'écoulement. La troisième composante est calculée numériquement en utilisant l'équation de conservation de la masse

dans le cas d'un fluide incompressible. Les mesures de PIV 2D peuvent être obtenues, soit simultanément en utilisant une caméra par plan de mesure, soit en déplaçant le plan de mesure très rapidement par rapport à la troisième composante de la vitesse. La méthode du scanning est particulièrement adaptée pour la micro-fluidique qui a souvent un accès optique et dont le plan de mesure correspond au plan focal du microscope. Généralement le scanning à l'échelle micrométrique se réalise à l'aide d'un piézoélectrique qui déplace l'objectif d'un microscope et donc le plan optique dans lequel la mesure est réalisée [7]. La méthode de balayage décrite ci-dessus a permis aux équipes suivantes [8, 10, 11] de scanner respectivement des systèmes de profondeur 100  $\mu\text{m}$ , 58  $\mu\text{m}$  et 25  $\mu\text{m}$ . Ces profondeurs sont limitées par l'utilisation d'un piézoélectrique pour mettre en mouvement l'objectif. Dans ce travail nous présentons une technique de scanning qui n'utilise pas un piézoélectrique mais un moteur permettant ainsi de scanner des systèmes de profondeur de 1 mm.

## 2 Description du dispositif expérimental

L'objectif de ce dispositif est de valider une technique de scanning pour des profondeurs importantes à l'échelle micrométrique, celle-ci aura pour vocation de mesurer les trois composantes de la vitesse dans divers systèmes micro-fluidiques.

Le système micro-fluidique étudié est un micro-canal rectangulaire d'une profondeur de 1 mm avec un débit entrant constant. Dans cette géométrie simple, il est possible de valider la vitesse horizontale mesurée à chaque niveau du scanning en la comparant avec une solution analytique de l'écoulement laminaire (cf. [12]) :

$$u_x(y, z) = \frac{\sum_{imp} \frac{1}{n^3} \left[ 1 - \frac{\cosh\left(\frac{n\pi y}{h}\right)}{\cosh\left(\frac{n\pi y}{2h}\right)} \right] \sin\left(\frac{n\pi y}{2h}\right)}{1 - \sum_{imp} \frac{192h}{n^5 \pi^5 e} \tanh\left(\frac{n\pi y}{2h}\right)} \quad (1)$$

avec  $u_x$  qui est la composante horizontale de la vitesse dans la direction de l'écoulement et  $n$  qui est un indice impair.  $h$ ,  $e$  et  $Q$  sont respectivement la hauteur, l'épaisseur du micro-canal et le débit.

### 2.1 Principe de la méthode

Comme il a été détaillé dans l'introduction le principe du scanning est de réaliser des mesures en deux dimensions à différents niveaux du système étudié, il est ensuite possible de remonter à la vitesse en trois dimensions à partir des données enregistrées dans chaque plans. Dans le sys-

tème de mesure présenté dans ce travail les sections optiques d'enregistrement des images sont fixés par la position de l'objectif du microscope. L'objectif du microscope est déplacé verticalement avec une fréquence fixée par un moteur permettant ainsi de balayer la profondeur du micro-canal.

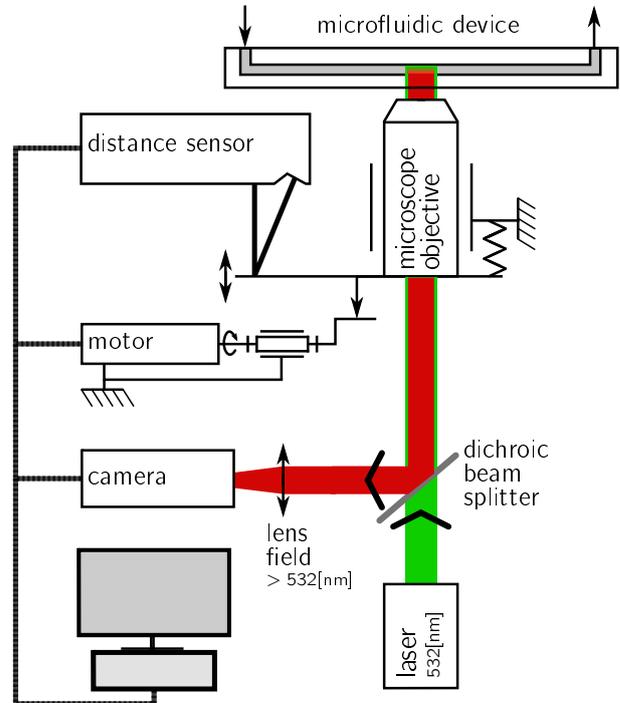


FIGURE 1 – Schéma de l'expérience.

Le principe de la méthode expérimentale est schématisé sur la figure 1 et les étapes peuvent être résumées de la façon suivante :

1. Un fluide translucide ensemencé de particules traceurs (Fluoro-Max) de diamètres 2.1  $\mu\text{m}$  est injecté dans un micro-canal de section droite  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  avec un débit connu à l'aide d'une pompe-seringue.
2. Le microscope concentre le faisceau lumineux d'un laser continu dans le plan focal de l'objectif qui est mis en mouvement rectiligne vertical par un moteur et un arbre à came.
3. Une caméra rapide dont le déclenchement est provoqué par le capteur de distance pour des positions choisies de l'objectif permet d'enregistrer la position des traceurs dans des sections horizontales prises pour différentes profondeurs à des instants connus.
4. La vitesse horizontale dans chaque plan est obtenue par corrélation entre les images.
5. La vitesse verticale est déterminée à partir des composantes horizontales de la vitesse et de l'incompressibilité.

## 2.2 Potentiel et discussion

Les paires d'images pour la PIV dans un plan sont constituées à chaque passage de l'objectif dans ce même plan. Pour pouvoir augmenter la plage de mesure et l'amplitude des vitesses, il faut donc pouvoir diminuer le temps entre chaque passage. Dans l'approche expérimentale présentée la vitesse de scanning théorique maximale est limitée par la fréquence d'acquisition minimale entre la caméra, l'intensité de la lumière émise par les traceurs, la vitesse de rotation du moteur et la fréquence d'acquisition du capteur de distance. Le moteur utilisé est un ESCON 70/10 qui a une fréquence maximale de 2.5 kHz, la caméra rapide (Photron FASTCAM SA4) a une fréquence de 3 kHz avec une résolution de  $1024 \times 1024$  px<sup>2</sup>, le capteur de distance DSE précis au micromètre a une fréquence d'acquisition de 2 kHz donc la vitesse d'acquisition maximale théorique est limitée par le capteur de distance et la lumière incidente. Cependant des problèmes de vibrations générées par le moteur seront discutées.

### Remerciements

Les auteurs de ce travail tiennent à remercier vivement les techniciens Guilian Geniquet et Arthur Buridon pour leurs participations à la réalisation du projet.

### Références

- [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*, Journal of Fluid Mechanics 304 (1995), 285-319.
- [2] J. Westerweel, *Fundamentals of digital particle image velocimetry*, Measurement science and technology 8(12) (1997), 1379.
- [3] A. Schröder, C. E. Willert, *Particle image velocimetry : new developments and recent applications*, Springer Science & Business Media, 2008.
- [4] J. Kuhlmann Abrantes, *Vélocimétrie par Image de Particules Holographique pour les Mesures de Turbulence de Paroi*, Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille 2012.
- [5] G. E. Elsinga, F. Scarano, B. Wieneke, B. W. van Oudheusden, *Tomographic particle image velocimetry*, Experiments in fluids 41(6) (2006), 933-947.
- [6] C. Gray, C. A. Greated, D. R. McCluskey, W. J. Eason, *An analysis of the scanning beam PIV illumination system* Measurement Science and Technology 2(8) (1991), 717.
- [7] S. T. Wereley, C. D. Meinhart, *Recent advances in micro-particle image velocimetry*, Annual Review of Fluid Mechanics 42 (2010), 557-576.
- [8] R. Lima, S. Wada, K.I. Tsubota, T. Yamaguchi, *Confocal micro-PIV measurements of three-dimensional profiles of cell suspension flow in a square microchannel*. Measurement Science and Technology 17(4) (2006), 797.
- [9] T. Tanaami, S. Otsuki, N. Tomosada, Y. Kosugi, M. Shimizu, H. Ishida, *High-speed 1-frame/ms scanning confocal microscope with a microlens and Nipkow disks*, Applied Optics 41(22) (2002), 4704-4708.
- [10] H. Kinoshita, S. Kaneda, T. Fujii, M. Oshima, *Three-dimensional measurement and visualization of internal flow of a moving droplet using confocal micro-PIV*, Lab on a Chip 7(3) (2007), 338-346.
- [11] S. A. Klein, *Volumetric Particle Velocimetry for Microscale Flows*, Doctoral dissertation, Arizona State University 2011.
- [12] H. Bruus, *Acoustofluidics 1 : Governing equations in microfluidics*, Lab on a Chip 11(22) (2011), 3742-3751.