

Micro-vélocimétrie par image de particules

Yannick KNAPP – Université d'Avignon, UAPV - UMR 1114

Eric BERTRAND – Université Aix-Marseille, IRPHE

yannick.knapp@univ-avignon.fr

Ce sont principalement les concepts de laboratoire sur puces (Lab On Chip) et de systèmes micro-électromécaniques (MEMS) qui sont à l'origine de la formidable évolution et de la multiplication des systèmes microfluidiques. La variété des techniques de fabrication a permis de faire évoluer ces systèmes tant dans le domaine des études scientifiques fondamentales que dans des applications industrielles : accéléromètres dans les smartphones, micro-générateur de jets pour imprimante à jet d'encre, micro-pompe à insuline implantable ne sont que quelques-unes des nombreuses réalisations déjà commercialisées. Toutefois, dans la mise au point de tels systèmes, des phénomènes souvent ignorés à l'échelle macroscopique prennent de l'importance et nécessitent d'être quantifiés à l'aide d'une métrologie adaptée. Les techniques expérimentales pour, par exemple, caractériser les écoulements dans de tels systèmes ont suivi cette tendance à la miniaturisation. Si les techniques mises en œuvre à l'échelle microscopique sont souvent le fruit de l'évolution de celles mises en œuvre à l'échelle macroscopique, cela ne va pas sans un certain nombre d'adaptations : exemple avec la micro-vélocimétrie par image de particules.

Quantifier les écoulements dans un système microfluidique

La réduction des dimensions qui a accompagné l'évolution de systèmes microfluidiques a conduit à la génération d'écoulements qui sont fondamentalement différents de ceux observés à l'échelle macroscopique. Les phénomènes observés sont ici encore plus complexes et difficilement appréhendés par la théorie. En particulier les effets surfaciques sont prédominants sur les effets de volume, les interactions entre les différents constituants des fluides en mouvement sont non linéaires, le mouvement Brownien des particules perturbe les techniques de métrologie classiques de la mécanique des fluides. L'aspect multiphysique et multiéchelle de ces problèmes les rend encore difficiles à appréhender à l'aide d'outils de simulation numérique et le recours à des expériences reste le seul moyen de caractériser ces phénomènes. Ainsi, afin de construire de nouveaux modèles, les techniques expérimentales et en particulier les techniques de métrologie des vitesses des fluides ont été amenées à suivre elles aussi l'évolution de la minia-

turisation. Parmi les techniques basées sur le suivi de traceurs particuliers suivant le fluide, la technique de micro-vélocimétrie par image de particules (μ PIV ou *micro particle image velocimetry*) est la méthode de référence pour quantifier rapidement les écoulements dans un système microfluidique. Alors qu'une méthode de vélocimétrie laser Doppler ne donne accès qu'à une composante de la vitesse (par faisceau laser) en un point de l'écoulement au prix d'un montage optique complexe, la μ PIV propose de réaliser une mesure instantanée de deux composantes de la vitesse du fluide dans un plan de l'écoulement, moyennant un montage optique simple.

La PIV classique

Technique de mesure

La vélocimétrie par image de particules (PIV) est une technique de mesure optique du champ de vitesse d'un fluide (figure 1). Pour réaliser une telle mesure, on enregistre l'image de particules ensemencant un écoulement éclairé par un plan lumineux pulsé. La nappe lumineuse permet de réaliser un filtrage spatial des

particules présentes dans l'écoulement : seules les particules éclairées par la nappe laser seront visibles sur l'image. Une électronique spécifique synchronise une pulsation de la lumière avec l'acquisition d'une image. Chaque image est ensuite subdivisée en fenêtres d'interrogation. La fonction de corrélation entre deux fenêtres localisées au même endroit sur les deux images permet d'estimer le déplacement moyen des particules présentes dans la fenêtre d'interrogation. L'intervalle de temps entre les deux pulsations du plan lumineux (potentiellement différent du temps entre les deux images) étant connu, on peut remonter à la vitesse locale dans la fenêtre d'interrogation.

Limites de la technique

La précision de la technique est liée à différents paramètres :

- L'épaisseur de la nappe laser « contraint » l'écoulement qui doit localement être plutôt plan ; un écoulement hautement tri-dimensionnel conduirait à un grand nombre de particules traversant la nappe et donc ne permettrait pas l'estimation des déplacements par défaut de corrélation. Réduire l'intervalle de temps

entre les impulsions du laser conduit à observer des déplacements plus petits et par conséquent plus sensibles aux erreurs.

- La taille et la « qualité » de l'image des particules sont déterminées d'une part par les particules présentes dans l'écoulement, et d'autre part par le couple éclairage-acquisition utilisé pour former les images. Le premier point conduit à résoudre l'équation opposant la taille (et donc la visibilité d'une particule) à sa capacité à suivre l'écoulement. Le principal paramètre d'ajustement est ici lié à la densité des particules utilisées qui doit de préférence être égale à la densité du fluide. L'usage de particules de taille micrométrique (1 à 100) conduit à matérialiser les particules par diffusion. Le couple éclairage-acquisition contraint aujourd'hui le système à l'usage d'une source laser (seule capable de fournir assez d'éner-

gie par unité de surface pour bien éclairer les particules) et à l'usage de caméras numériques de forte résolution (typiquement 2 à 4 Mpixels). Ces équipements concourent à l'objectif d'obtenir des images de particules de l'ordre de 2 à 3 pixel/particule, bien distinctes du bruit de fond.

- Le nombre de particules joue un rôle prépondérant dans la détermination d'une bonne fonction de corrélation. Il a été démontré que 6 à 8 images de particules sont au minimum nécessaires pour avoir une bonne estimation de cette fonction. Ce paramètre a une influence non négligeable sur la quantité de particules nécessaires dans l'écoulement pour satisfaire cette condition.

- L'algorithme de traitement des images et de calcul des fonctions de corrélation. En particulier il est préférable de mettre en

œuvre un algorithme à deux « passes », le premier donnant une estimation « grossière » du déplacement des particules par la méthode décrite ci-dessus, suivi par un second calculant la fonction de corrélation entre deux fenêtres d'interrogation situées à plus et moins un demi déplacement grossier autour du point d'intérêt.

Pour des profondeurs de corrélation millimétriques, les performances des systèmes actuels permettent d'atteindre des résolutions spatiales de l'ordre du millimètre dans des champs d'écoulement de plusieurs dizaines de centimètres carrés.

MicroPIV

Les nouvelles contraintes ...

Le premier système de μ PIV a été mis au point en 1998 par Santiago et al. Cette équipe a repris les grandes lignes de la méthode PIV classique en l'adaptant à une observation sous microscope (figure 2). Toutefois, par le fait que les écoulements observés sont à l'échelle microscopique, la technique a dû évoluer pour tenir compte de :

- la miniaturisation des particules : leur taille devient similaire à la longueur d'onde du laser utilisé pour les éclairer, et la quantité de lumière qu'elles diffusent devient incompatible avec la sensibilité des caméras ;
- la quantité de particules nécessaire à la condition du nombre de particules par fenêtre d'interrogation ne peut pas toujours être respectée car elle conduit à des concentrations élevées en particules qui potentiellement modifient le caractère rhéologique du fluide ;
- la difficulté de réaliser des plans laser compatibles avec la taille des systèmes microfluidiques observés.

... font évoluer la technique

Ces contraintes ont conduit à faire évoluer la technique classique vers une technique utilisant principalement :

- Des particules fluorescentes. De telles particules combinées avec un éclairage laser aisé à filtrer permettent de satisfaire les conditions de taille et de qualité des images de particules. Il faut toutefois avoir recours à des caméras numériques

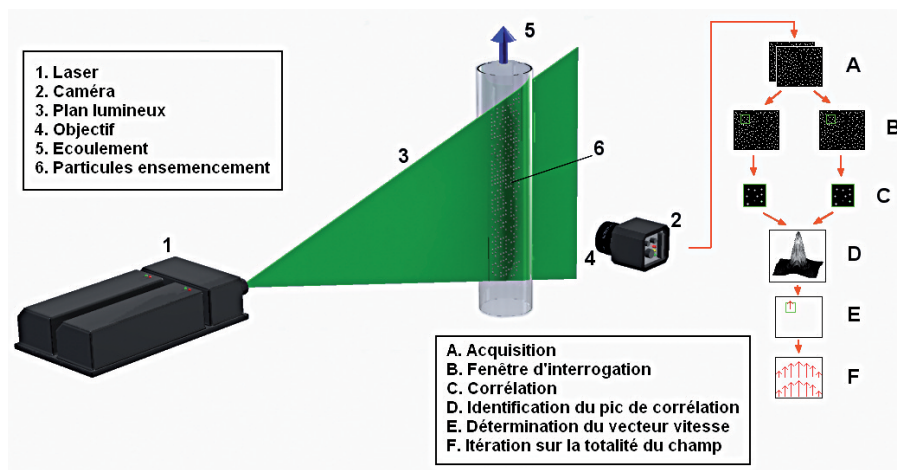


Figure 1. Principe de la vélocimétrie par image de particules (PIV).

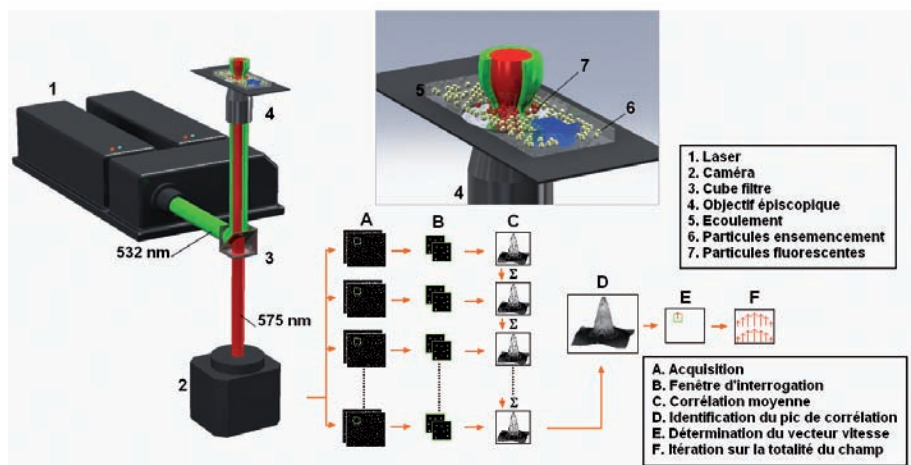


Figure 2. Premier système de microPIV mis au point en 1998 par Santiago et al.

de plus forte sensibilité (typiquement 1 Mpixels refroidies) et des optiques de qualité.

- Un système d'illumination globale et un filtrage spatial réalisé par la profondeur de champ des objectifs du microscope se traduisant par une profondeur de corrélation. Une telle configuration optique permet de réaliser rapidement des explorations en profondeur du système microfluidique pour peu que l'objectif soit monté sur un système piézo-électrique, mais conditionne le système à des couples profondeur de champ/taille de l'image donnés. De plus, l'utilisation d'un éclairage global conduit à des images de moins bonne qualité puisque toutes les particules présentes dans l'écoulement sont soumises à fluorescence, et les particules positionnées devant le plan délimité par la profondeur de champ contribuent à l'image aussi bien que celles positionnées derrière.

- Un algorithme de traitement d'image basé sur des fonctions de corrélation moyennées sur une succession d'acquisitions. Un tel algorithme permet d'additionner les contributions de qualités différentes (certaines réalisant par exemple la condition sur le nombre de particules minimal, d'autres non) et d'estimer une fonction de corrélation de meilleure qualité. On contraint ici le système à la quantification d'écoulements stationnaires. Les écoulements instationnaires seront traités avec des algorithmes « classiques » mais nécessiteront un filtrage adéquat permettant d'éliminer tous les faux vecteurs issus de corrélations erronées.

Une technologie mature

À l'énumération de ces solutions et contraintes technologiques, il est évident qu'il est plus facile de réaliser des mesures dans un écoulement monophasique d'un liquide en écoulement stationnaire que dans un écoulement polyphasique (une des phases étant un gaz) en écoulement fortement instationnaire (typiquement fortement turbulent). Toutefois les technologies appliquées sont aujourd'hui mûres et la réalisation de telles mesures est assez courante. Plusieurs systèmes « clés en main » sont commercialisés et atteignent, pour des profondeurs de corréla-

tion micrométriques, des résolutions spatiales de l'ordre de quelques micromètres dans des champs d'écoulement de plusieurs milliers de micromètres carrés.

Exemple d'application

Les milieux poreux naturels (structures géologiques, biologiques...) présentent des géométries d'écoulement à l'échel-

le microscopique souvent difficiles à caractériser du fait de l'opacité de la phase solide. Les techniques de fabrication utilisées pour le développement de systèmes microfluidiques permettent de reproduire de tels milieux à l'échelle 1 et ainsi de reproduire des configurations d'écoulement réalistes. Parmi les sujets d'études d'intérêt dans ce type de milieu on peut citer le transport de colloïdes : polluants dans des systèmes géologiques,

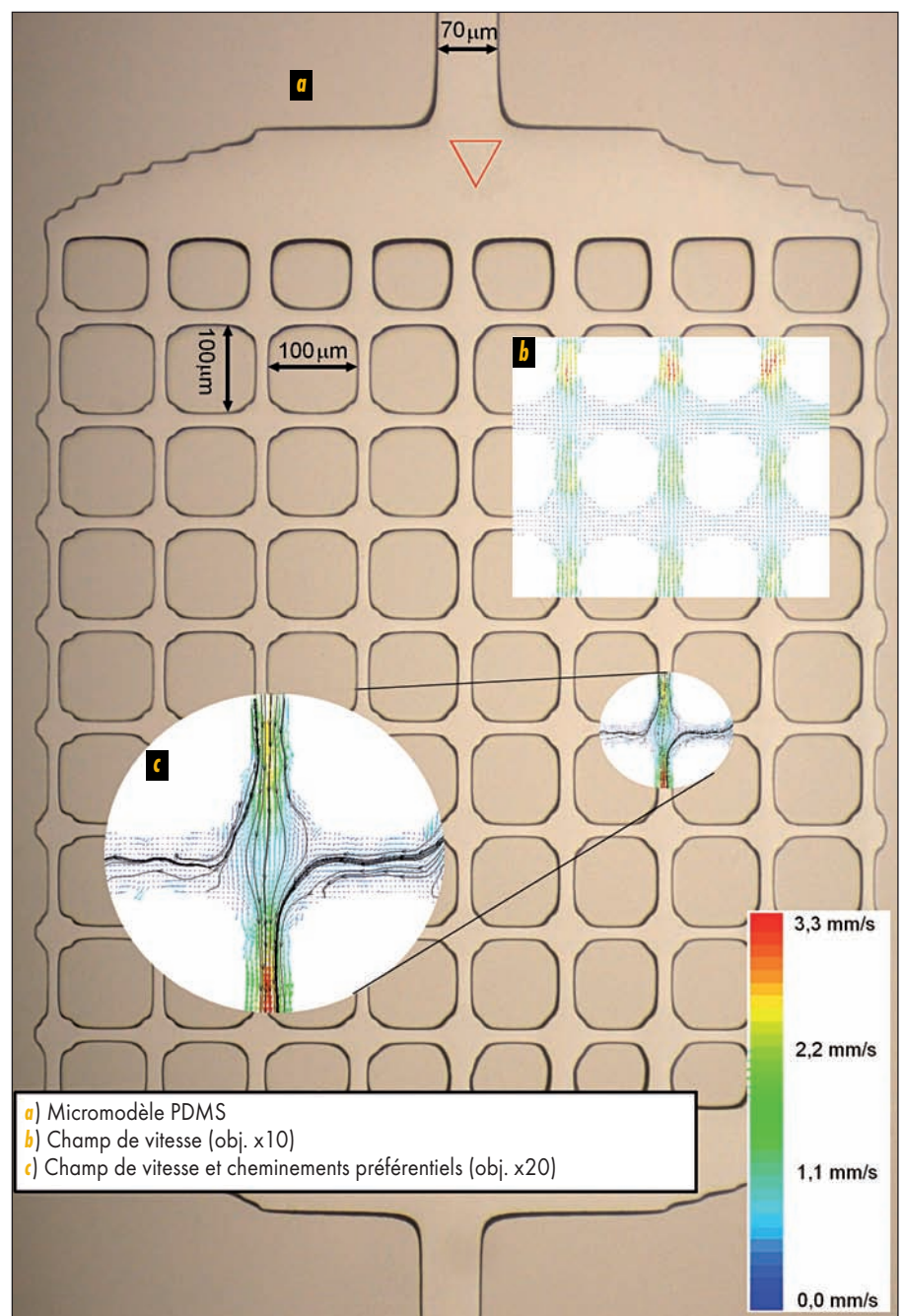


Figure 3. (a) Modèle de milieux poreux obtenu par lithographie molle sur PDMS. (b) et (c) Résultats obtenus sur un fluide ensemené de particules de polystyrène fluorescentes et éclairé par un laser YAG.

nutriments ou principes actifs médicamenteux dans les systèmes biologiques. Pour étudier de tels phénomènes des modèles de milieux poreux ont été développés. Ils consistent en un réseau de canaux de $13\ \mu\text{m}$ de haut et de $10\text{--}20\ \mu\text{m}$ de large, entrelacés dans un plan (figure 3). Ces géométries sont obtenues par lithographie molle sur PDMS à partir d'un moule en silicium obtenu par photolithographie d'un réseau quadrilatéral de corps cylindriques (environ $100\ \mu\text{m}$ de diamètre). Les modèles résultants ont les caractéristiques géométriques et dimensionnelles semblables à celles observées dans un milieu tel qu'un sol (porosité env. 0,3 et perméabilité env. $10^{-12}\ \text{m}^2$).

Les expériences de μPIV ont été réalisées dans une section située à mi-hauteur du modèle avec un système de μPIV de TSI Inc. Le fluideensemencé de particules de polystyrène fluorescentes était éclairé par un laser YAG. Les paires d'images de l'écoulement ont été acquises avec une caméra digitale refroidie ayant une réso-

lution de 1280×1024 pixels et une dynamique de 12 bits. En fonction de l'objectif de microscope utilisé, des champs de plus de 1200 vecteurs étaient déterminés dans une zone d'observation aussi petite que $200 \times 200\ \mu\text{m}^2$ (figure 3 b, c). Les images ont été analysées à l'aide d'un algorithme standard utilisé en μPIV et basé sur la corrélation moyenne d'ensemble des zones d'interrogation. Les mesures ont été utilisées pour déterminer les variations de vitesse sur les trajectoires et lignes de courant dans les différents micro-modèles. Ces résultats ont été comparés aux observations et résultats des mesures du coefficient de dispersion et des temps de résidence.

Évolution future

La métrologie μPIV est aujourd'hui principalement limitée par l'usage des traceurs pour ensemençer l'écoulement. En effet, pour obtenir une caractérisation

encore plus fine des écoulements et gagner, par exemple, un facteur d'échelle (micro-vélocimétrie \rightarrow nano-vélocimétrie) il n'est pas possible de continuer à utiliser des traceurs discrets (particules) d'une part du fait de leur taille par rapport aux géométries d'écoulement et d'autre part du fait de la concentration nécessaire pour appliquer des méthodes de corrélation. Une première évolution des systèmes de métrologie a déjà permis de répondre à la seconde contrainte et la μPIV a, pour certaines applications déjà évolué vers la μPTV (*micro particle tracking velocimetry*). Dans cette technique les particules sont identifiées et suivies individuellement au cours du temps. Toutefois la détectabilité des particules reste un sujet de recherche et même si on réalise aujourd'hui des mesures de type μPIV avec des traceurs atteignant la taille d'une molécule, l'obtention de champs de vitesse dans des nano-écoulements reste un défi à relever.



CONEX-
AG-LS25027P



CONEX-
AG-M100D



CONEX-
AG-PR100P

CONEX

Nouveaux ensembles de micropositionnement intégrés.

Une connexion aisée pour un système de contrôle simple.

Depuis l'arrivée de ses produits Agilis™, MICRO-CONTROLE a poursuivi son avancée technologique de pointe en matière de moteurs piézoélectriques. Les innovations en termes de conception et de fabrication ont abouti à un ensemble de solutions à prix réduit, à haute résolution, en boucle fermée ou à positionnement absolu, utilisées dans le cadre de recherches avancées et idéales pour les applications OEM dans les domaines de la cytométrie, de la stabilisation de faisceau ultra rapide et de la recherche génomique. Grâce à nos contrôleurs CONEX™ intégrés et à notre plate-forme logicielle de gestion d'instruments NSTRUCT™, bénéficiez d'une configuration plus simple et d'un point de contrôle unique pour l'ensemble de vos besoins en matière d'instruments.

Si vous cherchez une solution de positionnement, consultez www.newport.com/piezo-11 ou appelez-nous.

For Motion, Think Newport™

MICRO-CONTROLE Spectra-Physics S.A.S

1, rue Jules Guesde – Bâtiment B
Zl. du Bois de l'Épine – BP189
91006 Évry CEDEX

Tél.: 01.60.91.68.68
Fax: 01.60.91.68.69

e-mail: france@newport.com



© 2012 Newport Corporation.



Les marques de Newport Corporation – New Focus™ • Ophir® • Oriol® Instruments • Richardson Gratings™ • Spectra-Physics® • Spiricon®

AD-011207-FR