

## Mesures $\mu$ PIV dans un modèle de milieu poreux

Yannick KNAPP\*, Eric BERTRAND\*\*, Jean STEFANINI\*\*\*

\* Université d'Avignon, UMR CSE, F-84914, Avignon

\*\* Equipe de Biomécanique Cardiovasculaire, IRPHE, F-13184, Marseille

\*\*\* TSI Inc. France, F-13013, Marseille

yannick.knapp@univ-avignon.fr

### Résumé :

*L'étude présentée porte sur la mesure des champs de vitesses dans un milieu poreux et en particulier dans les pores de tels milieux. Le milieu poreux utilisé possède des caractéristiques géométriques et dimensionnelles proches de celles observées dans le cas d'un sol. Les champs de vitesses sont déterminés à l'aide d'une méthode de micro vélocimétrie par image de particules ( $\mu$ PIV) adaptée aux spécificités du modèle utilisé. Les résultats obtenus sont comparés à des observations réalisées sur un modèle similaire dans le cadre d'une étude portant sur la détermination des capacités de filtrage de ce type de milieu au regard de la taille des particules (phénomène de ségrégation). Les deux types de résultats sont en bon accord et les hypothèses formulées pour expliquer le filtrage partiel sont confirmées par la présente étude.*

### Abstract :

*The study presents the measurement of velocity fields in a porous media with a specific view inside the pore volume. The porous media used here possesses the same geometric and dimensional features as those observed in the case of a soil. The velocity fields are determined by a specific micro particle image velocity ( $\mu$ PIV) adapted to the specificities of the models. The results obtained are compared to observations achieved on a similar pattern in a study concerned by the determination of the filtering capacities of this type of media with regard to the size of the particles (segregation phenomenon). The two types of result are in good agreement and the hypotheses formulated in order to explain the partial filtering is confirmed by the present survey.*

### Mots-clefs :

**milieu poreux ; microPIV ; cheminement préférentiel**

## 1 Introduction

Les études sur le comportement hydrodynamique de milieu poreux représentent un intérêt certain du fait de l'existence de tels milieux dans un grand nombre de domaines : géologie, tissus biologiques, industrie etc. Plus que tout autre, et bien qu'ayant fait l'objet d'un grand nombre d'études, les milieux poreux hétérogènes présentent la difficulté particulière de relier les phénomènes à différentes échelles. Cette difficulté se traduit entre autres par l'incapacité de certains modèles macroscopiques de traduire des phénomènes tels que les cheminements préférentiels.

La présente étude porte sur l'analyse de l'écoulement à travers des modèles bidimensionnels de milieu poreux à l'échelle microscopique. En effet les études et caractérisations des écoulements à l'échelle du pore sont souvent réalisées après redimensionnement des modèles pour les rendre utilisables avec des techniques métrologiques habituelles en mécanique des fluides telles que la vélocimétrie laser doppler, la vélocimétrie par image de particules ou le suivi de particules (voir les travaux de Stohr *et al.* (2003) par exemple). L'originalité des travaux présentés ici est liée au fait que les modèles utilisés ont les caractéristiques géométriques et dimensionnelles semblables à celles observées dans un milieu tel qu'un sol. Les modèles utilisés consistent en un réseau de canaux entrelacés dans un plan

(Figure 1). 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. Les champs de vitesses sont mesurés dans ces modèles transparents au moyen d'une méthode de vélocimétrie par imagerie de particules, développée pour des écoulements dans des micro-canaux.

## 2 Dispositif expérimental

### 2.1 Micromodèles

Les micromodèles utilisés pour cette étude ont été développés et fabriqués suivant le procédé décrit par Auset et Keller (2004). Les géométries des réseaux sont obtenues par lithographie molle sur PDMS à partir d'un moule en silicium obtenu par photolithographie d'un réseau quadrilatéral de corps cylindriques d'environ 60 $\mu\text{m}$  de diamètre (Figure 1).

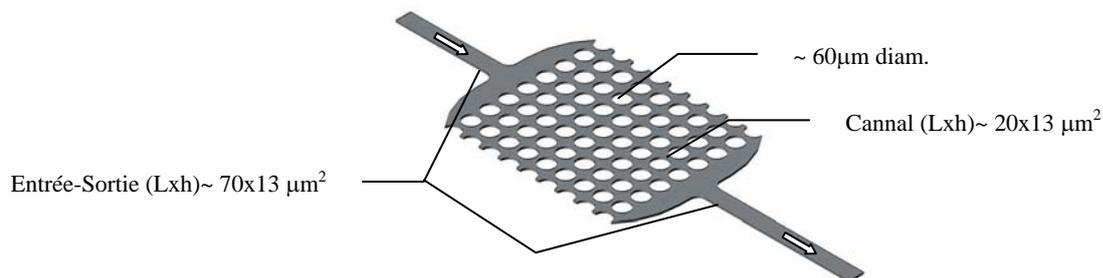


FIG. 1 – Schéma du volume fluide associé au milieu poreux.

Les caractéristiques géométriques du réseau retenu pour la présente étude sont données sur la Figure 1 ci-dessus. Les modèles résultants ont les caractéristiques géométriques et dimensionnelles suivantes : porosité env. 0.3 et perméabilité env.  $10^{-12} \text{ m}^2$ .

### 2.2 MicroPIV

Les expériences de  $\mu\text{PIV}$  ont été réalisées avec un système commercial de TSI Inc. (Figure 2b). Ce système schématisé sur la Figure 2a est constitué d'un microscope inversé à épifluorescence (Nikon) associé à une caméra CCD refroidie ayant une résolution de  $1280 \times 1024$  pixels<sup>2</sup> et une dynamique de 12 bits (Sensicam).

Concernant la profondeur de champ  $\delta_z$ , les travaux de Meinhardt *et al.* (2000a) sur ce sujet ont montré qu'une bonne estimation était donnée par l'expression :

$$\delta_z = \frac{3n\lambda}{NA^2} + \frac{2.16 d_p}{\tan \theta} + d_p$$

ou  $n$  est l'indice de réfraction du milieu dans lequel baigne l'objectif,  $\lambda$  est la longueur d'onde de la source lumineuse,  $NA$  et  $\theta$  respectivement le nombre et l'angle d'ouverture de l'objectif du microscope et  $d_p$  le diamètre des particules utilisées pour l'ensemencement. Les éléments relatifs aux expériences présentées ici conduisent à une profondeur de champ de l'ordre de 8  $\mu\text{m}$  pour l'objectif x20 et de 19  $\mu\text{m}$  pour l'objectif x10. Dans les deux cas la profondeur de champ a été centrée sur la hauteur du conduit. Cette profondeur de champ est de l'ordre de grandeur de la hauteur du conduit de sorte que les champs de vitesses déterminés au cours des différentes expériences sont des champs de vitesses moyennés sur cette épaisseur. Les

vitesse observées sont de ce fait inférieures aux mesures qu'on aurait obtenu si une mesure dans le plan à mi-épaisseur avait été possible.

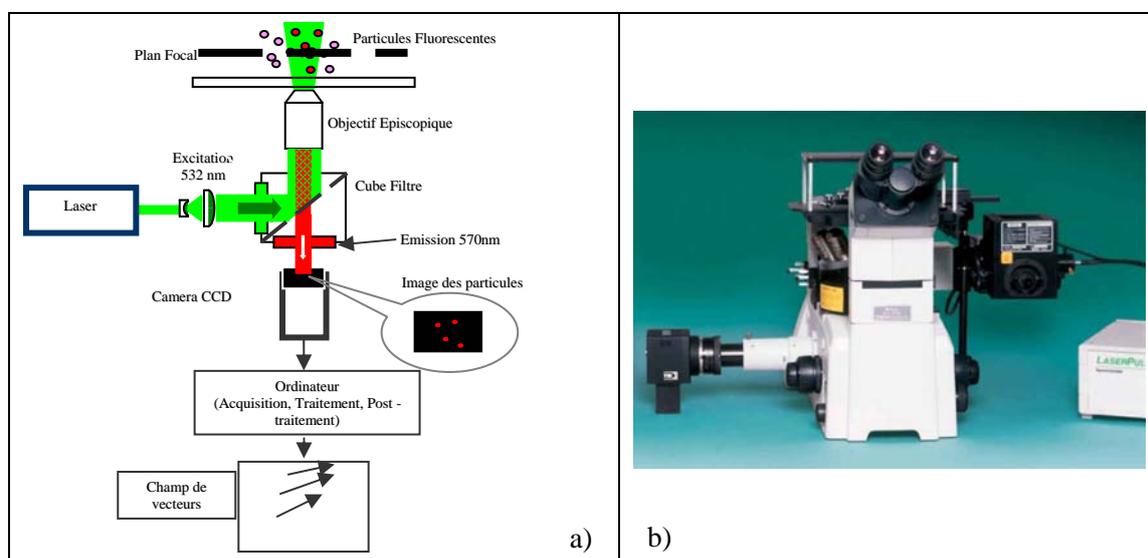


FIG. 2 – Système de  $\mu$ PIV. a) Cheminement optique, b) Système.

Le fluide estensemencé de particules de polystyrène fluorescentes (Fluosphere F8819) de  $1\mu\text{m}$  de diamètre avec une concentration de  $2.10^{10}$  particules/ml. Cette concentration est suffisante pour obtenir des champs de vitesses par la méthode retenue tout en évitant le blocage des canaux par l'accumulation de particules. Comme le montrent les travaux de Sharp et Adrian (2005) la probabilité d'apparition d'un blocage des canaux par accumulation des particules est essentiellement liée au rapport du diamètre des particules au diamètre des conduits. Ce rapport doit rester inférieur à 0.3-0.4 pour éviter ce type de blocage. Dans notre modèle ce rapport n'excède pas 0.1. La vitesse de sédimentation pour ces particules est de l'ordre de  $3.10^{-2} \mu\text{m/s}$  ce qui était considéré comme négligeable au regard du temps d'observation des particules (de l'ordre de la seconde). La source lumineuse utilisée est un laser Yag émettant à 532 nm permettant l'excitation des particules à une longueur d'onde proche de leur excitation maximale de 535 nm. La longueur d'onde du maximum ré-émis par les particules est de 575 nm. Les paires d'images de l'écoulement sont acquises puis stockées pour traitement dans un ordinateur. Les images sont analysées à l'aide d'un algorithme standard utilisé en  $\mu$ PIV. Au cours de cette analyse des cellules d'interrogation, les déplacements des particules sont estimés au moyen d'une corrélation moyenne d'ensemble et d'un raffinement des cellules d'interrogation. Ce raffinement résulte d'un processus itératif dans lequel le résultat de la corrélation sur une taille de cellule sert de base pour le calcul de la corrélation des cellules de taille plus petite (Meinhart 2000b). Ces deux procédés servent à augmenter le nombre de cellules d'interrogation valides par accumulation de l'information (en cas d'unensemencement trop faible) et d'obtenir une résolution spatiale autrement impossible. Ce traitement se justifie aussi par la dimension de la profondeur de champ au regard du milieu observé ; les particules contribuant au calcul de la corrélation peuvent se situer n'importe où dans l'épaisseur du réseau de sorte que l'usage d'une moyenne s'impose.

En fonction de l'objectif de microscope utilisé, des champs de plus de 1200 vecteurs sont déterminés dans une zone d'observation aussi petite que  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ .

Enfin la calibration du système de  $\mu$ PIV est réalisée à partir de dimensions connues des micromodèles. Ces dimensions sont obtenues à partir d'observations des micromodèles sous un microscope électronique à balayage.

L'ensemble de ces paramètres a permis de réaliser tous les essais présentés ici avec une excellente reproductibilité.

## 2.3 Expériences

Les expériences ont consisté à réaliser un écoulement dans le modèle au moyen d'une charge hydrostatique à partir d'un grand volume de fluide. Les débits très faibles et une durée d'acquisition inférieure à 10 minutes par cas, résultent en une variation non mesurable de la charge permettant ainsi de la considérer comme constante.

## 3 Résultats

### 3.1 Champs de vitesses

Les champs de vitesses dans les différentes parties du modèle ont été déterminés par la méthode décrite au §2.2 : canal amont, divergent d'entrée, convergent de sortie et volume poral (Figure 3).

Une attention particulière a bien sur été portée aux écoulements dans les volumes constituant les pores de notre milieu. Ces mesures et observations montrent clairement qu'en aucun cas l'écoulement n'est symétrique dans les pores. Ainsi, même si une répartition très homogène des écoulements en entrée et en sortie est observée, l'écoulement dans un pore ne suit pas la direction principale de l'écoulement sur la totalité du flux entrant ; une partie du fluide est déviée et alimente le pore latéral.

Afin de mieux quantifier la répartition des flux suivant les différents ports de sortie, les champs de vitesse obtenus ont été post-traités.

### 3.2 Lignes de courant/Trajectoires

Les lignes de courant/trajectoires de particules fluides (Figure 4) ont été déterminées à partir des champs de vitesses en calculant les positions successives de ces particules fluides sans masse à partir d'une ligne d'émission localisée en aval d'un pore (relativement à l'écoulement principal). Pour cela :

- chaque ligne d'émission compte 1000 points,
- le déplacement local de la particule a été déterminé à partir d'une interpolation bilinéaire du champ de vitesse,
- l'intervalle de temps nécessaire au calcul du déplacement a été défini tel qu'en moyenne une dizaine de déplacement soit nécessaire pour parcourir une cellule d'interrogation,
- dans le cas d'une paroi la particule fluide est considérée faire un rebond "élastique".

Ce processus est automatisé pour permettre une analyse statistique des trajectoires empruntées et par conséquent de déterminer les relations entrée/sortie d'un pore.

Les statistiques obtenues pour les différents débits réalisés au cours de ces expériences montrent que seuls 65 à 68 % des particules fluides émises prennent le chemin direct proposé par la direction principale de l'écoulement. En conséquence 32 à 35 % de ces particules sont réorientées. Un examen détaillé sur l'origine des lignes de courant présentant une réorientation, montre que celles-ci sont originaires d'une zone proche de la paroi et sur un seul coté de la ligne d'émission.

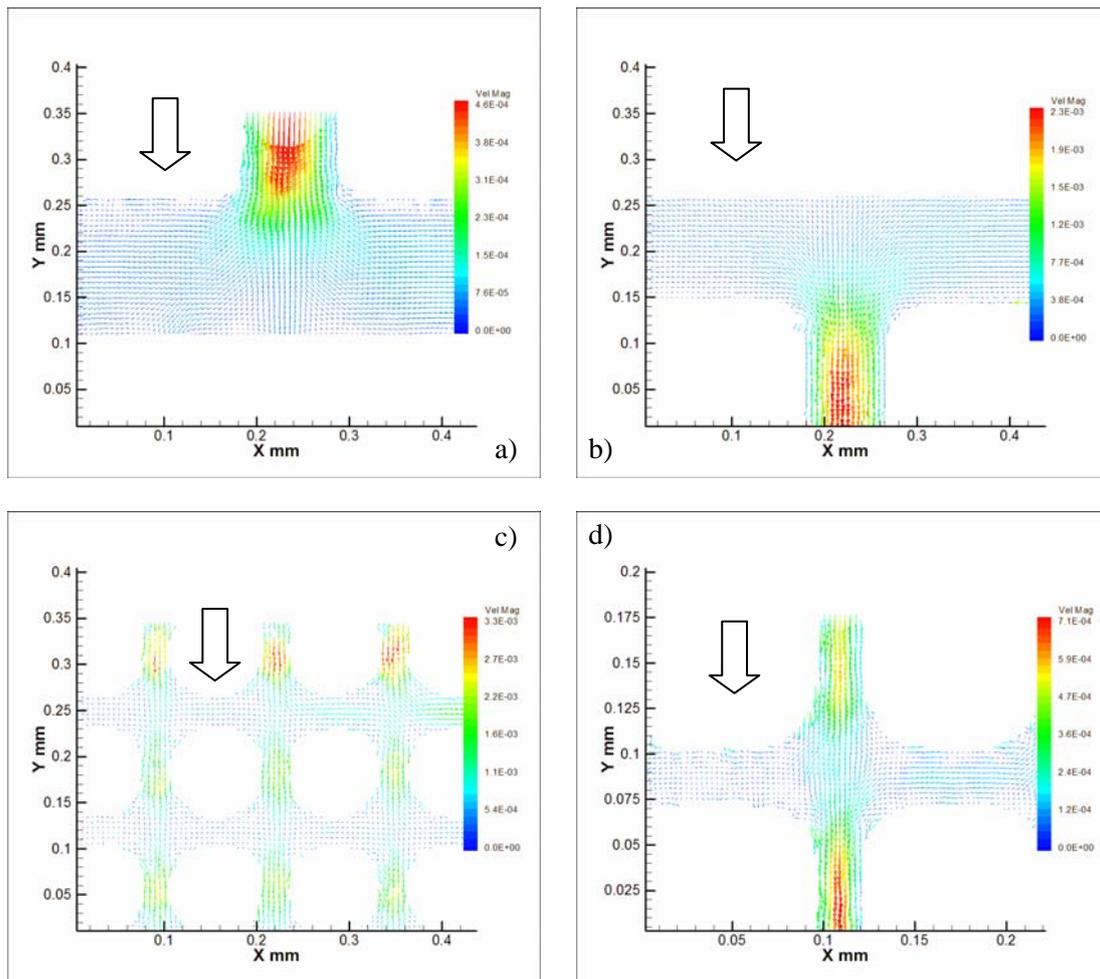


FIG. 3 – Champs de vitesses [m/s] obtenus dans différentes parties du micromodèle avec différents objectifs de microscope. a) divergent d'entrée 20x, b) convergent de sortie 20x, c) volume poral 10x, d) volume poral 20x.  
La flèche indique la direction principale de l'écoulement.

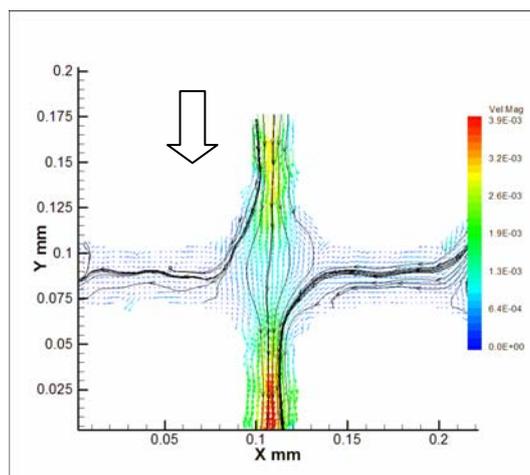


FIG. 4 – Lignes de courant/trajectoires. La flèche indique la direction principale de l'écoulement.

Si on observe alors la succession de volumes poraux suivant la direction principale de l'écoulement, il apparaît qu'il n'y a pas d'effet cumulatif en matière de réorientation. En effet, les trajectoires montrant une réorientation dans un volume poral amont ne sont pas, ou très rarement, sujettes à une réorientation dans le volume poral aval et ce, quelque soit le débit.

Ces observations peuvent alors compléter les essais et observations réalisés par Auset et Keller (2004) qui portaient sur le suivi de particules monodisperses (polystyrène, 2 à 7  $\mu\text{m}$ ) à très faible concentration au cours de leur migration dans un tel micromodèle (micromodèle B dans ces travaux). Les résultats de ces essais montraient un faible nombre de réorientations des trajectoires de ces particules au cours de leur transport et ce quelle que soit la taille et pour les mêmes gammes de débit. Le phénomène associé à ces réorientations est décrit dans la littérature comme l'exclusion de taille (size exclusion) résultant du fait que, les lignes de courant susceptibles de conduire à une réorientation des particules, sont celles proches de la paroi, et que plus une particule est petite, plus elle peut s'approcher de la paroi (voir les travaux de James et Chrysikopoulos (2003) sur ce sujet).

Ce phénomène, conduisant à priori à une réorientation systématique des particules localisées près de la paroi, est donc pondéré par les observations réalisées ici.

#### 4 Conclusions

Les expériences présentées dans cette étude ont montré 3 résultats :

- la faisabilité et l'intérêt d'expériences de microPIV dans des réseaux de milieux poreux modèles de très petite échelle (jamais atteints dans la littérature à ce jour),
- l'existence de cheminements particuliers non "rectilignes" dans des réseaux à priori symétriques,
- la pondération probable du phénomène d'exclusion de taille décrit dans la littérature par des phénomènes d'origine purement hydrodynamiques

Ces travaux aux résultats prometteurs ne représentent toutefois qu'une première étape. En effet d'autres cas de figures (taille, géométries, débits, analyse volumétrique plus détaillée...) vont être examinés avant de pouvoir conclure sur ces travaux.

#### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Maria Auset (Université Californie Santa Barbara), Anne Bergeret et Jean Marie Taulemesse (Ecole des Mines d'Alès) pour leur contribution essentielle à ce travail.

#### Références

- Auset, M., Keller, A.A., 2004 Pore-scale processes that control dispersion of colloids in saturated porous media, *Water Resour. Res.*, 40, W03503, doi:10.1029/2003WR002800
- James, S.C., Chrysikopoulos, 2003 Effective velocity and effective dispersion coefficient for finite-sized particles flowing in a uniform fracture, *J. Colloid Interface Sci.*, 263, 288-295
- Meinhart, C.D., Wereley, S.T., Gray, M.H.B., 2000a Volume illumination for two-dimensional particle image velocimetry, *Meas.Sci.Technol.* **11**, 809-814.
- Meinhart, C.D., Wereley, S.T., Santiago J.G., 2000b A PIV Algorithm for Estimating Time-Averaged Velocity Fields, *Journal of Fluids Engineering*, **122**, 285-289
- Sharp, K.V., Adrian, R.J., 2005 On flow-blocking particle structures in microtubes, *Microfluid Nanofluid*, **1**, 376-380
- Stohr, M., Roth, K., Jahne, B., 2003 Measurement of 3D pore-scale flow in index matched porous media, *Experiments in Fluids*, **35**, 159-166