



Mesure des champs de vitesse et débit d'écoulement par la méthode LSPIV : application sur un modèle réduit d'une bouche de métro

Walid BOUCHENAF¹, Olivier BOUCHER²,
Nassima MOUHOUS-VOYNEAU¹, Philippe SERGENT²

1. Equipe AVENUES-GSU EA 7284. Département du Génie des Systèmes Urbains. Université de Technologie de Compiègne. Centre Pierre Guillaumat, rue du Docteur Schweitzer, BP 60319, 60203 Compiègne Cedex. France.
walid.bouchenafa@utc.fr ; nassima.voyneau@utc.fr
2. CEREMA, 134 rue de Beauvais, CS 60039, 60280 Margny Lès Compiègne, France.
Philippe.Sergent@cerema.fr ; Olivier.Boucher@cerema.fr

Résumé :

Cet article présente une technique de mesure de la vitesse en surface d'un écoulement fluvial pour en déduire le débit. La Technique LSPIV (Large Scale Particule Image Velocimetry) permet de mesurer les vitesses en surface de l'écoulement par analyse de séquence d'image. Les potentiels de cette technique sont présentés dans un cas d'application en laboratoire : Ecoulement entrant dans un modèle réduit d'une bouche de métro. Les résultats de mesure sont comparés à ceux produits par un calcul numérique effectué par le logiciel Fudaa- Reflux.

Mots-clés : Ecoulement Fluvial, Hydrométrie, Modèle physique, Crue, Fudaa Reflux, Fudaa LSPIV

1. Introduction

La méthode LSPIV (Large Scale Particule Image Velocimetry) est utilisée pour mesurer les écoulements in situ (rivière, réseau urbain) et en laboratoires. Cette technique a été utilisée pour estimer en continu les débits de la rivière Iowa (HAUET, 2006) et pour améliorer des courbes de tarage pour un régime d'écoulement normal (LE COZ *et al.*, 2010). La LSPIV a aussi été utilisée lors des expériences en laboratoire pour l'étude des écoulements de ruissellement sur un versant (LEGOUT *et al.*, 2012) dans lesquels les dispositifs intrusifs ne peuvent pas être instrumentés du fait des très faibles hauteurs d'eau estimées en millimètre. La LSPIV s'est montrée un outil performant pour l'étude de l'écoulement sur un modèle réduit à fond mobile (HAUET *et al.*, 2014). Cependant il existe encore des domaines où les techniques de mesure rencontrent des difficultés lorsqu'elles sont appliquées aux problèmes des écoulements dans les canaux à surface libre ou dans certaines structures artificielles (GHOSTINE.2009) en particulier lorsque l'interaction de l'eau avec la géométrie de l'ouvrage engendre des structures hydrauliques mal connues

Dans notre travail, nous étudions l'application de la méthode LSPIV dans une bouche de métro dans laquelle les processus physiques et le mécanisme de l'écoulement sont complexes. Cet article présente des résultats d'estimation des vitesses de surface de l'écoulement obtenus par la technique LSPIV pour un écoulement fluvial dans un modèle réduit d'une station de métro après avoir présenté succinctement les principes généraux de la technique LSPIV dans le logiciel Fudaa – LSPIV.

2. Technique de LSPIV

L'analyse de séquences d'images permet de mesurer le champ 2D de vitesse en surface d'un écoulement à condition que des traceurs visibles, tels que des petits flotteurs (bouchons, billes de polystyrène, etc.) ou particules solides (toujours présentes en crue) soient advectés avec l'écoulement.

La mesure LSPIV comprend (a) l'enregistrement d'une séquence d'images horodatées de l'écoulement, (b) une correction géométrique des images pour s'affranchir des effets de distorsion de perspective (orthorectification) et (c) un calcul du déplacement des traceurs de l'écoulement grâce à une analyse statistique en corrélation des motifs.

Connaissant le niveau d'eau et supposant un modèle de distribution verticale des vitesses, on peut estimer le débit à partir du champ des vitesses LSPIV.

Pour une description détaillée de la méthode, le lecteur pourra se référer par exemple aux travaux de Hauet. (HAUET, 2006) et Muste (MUSTE *et al.*, 2008).

Le débit d'écoulement peut être estimé à partir du champ de vitesse LSPIV si la bathymétrie d'une section en travers est connue avec l'hypothèse de distribution verticale de vitesse. On se retrouve alors dans le cas similaire aux jaugeages de surfaces utilisant des traceurs ou des vélocimétries radar SVR par exemple, la seule différence est qu'on possède un champ de vitesse de surface au lieu de quelques mesures ponctuelles.

3. Etape de la méthode LSPIV

3.1 Les ortho rectifications des images

Cette étape consiste à obtenir des images dont la géométrie a été redressée de façon à ce que chaque point soit superposable à une carte plane qui lui correspond. Une image ortho rectifiée doit être prise à la verticale de tous les points qu'elle figure, ces derniers étant situés sur un terrain plat. Cela correspond aussi à un ensemble de pixels carrés de dimensions connues.

Ce traitement nécessite la connaissance de points de référence identifiables sur les images et dont les coordonnées dans le repère de l'image et dans le repère réel soient connues, les GRP pour Ground Reference Points. Le logiciel Fudaa LSPIV fournit une assistance afin de déterminer les coordonnées images des GRP, saisir leurs coordonnées

réelles, puis calculer une matrice d'ortho rectification pour la correction de chaque pixel des images.

Un système d'équations à 11 inconnues est obtenu et résolu par optimisation en ayant aux moins 6 GRP (JODEAU *et al.*, 2013). La figure 1 montre un exemple d'image ortho rectifiée.

Afin de faciliter l'application opérationnelle de la méthode, un logiciel, libre et gratuit Fudaa-LSPIV, a été développé par la société DeltaCAD dans le cadre d'une collaboration entre EDF et IRSTEA (HAUET *et al.*, 2014).

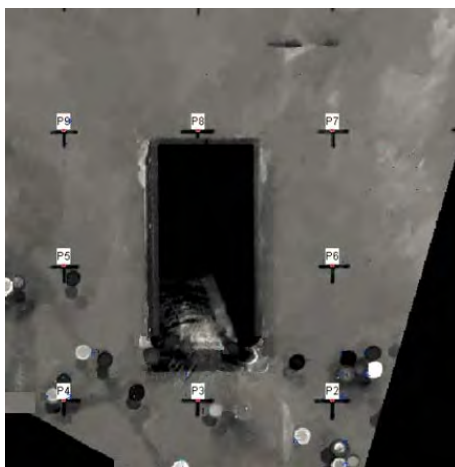


Figure 1. Exemple d'ortho rectification d'une image d'un modèle de bouche de métro.

3.2 Analyse du déplacement des traceurs

Afin de déterminer le déplacement des traceurs en surface, une analyse statistique en corrélation est effectuée sur les images ortho rectifiées. Le logiciel Fudaa- Reflux utilise un algorithme optimisé pour l'application spatiale avec des résolutions d'images pouvant être faibles. Le calcul de la correction entre une fenêtre d'interrogation (IA pour interrogation Area) centrée sur un point a_{ij} dans une image et la même IA centrée sur un point b_{ij} dans l'image suivante, séparée par un intervalle de temps δt . Le coefficient de corrélation est alors :

$$R(a_{ij}, b_{ij}) = \frac{\sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} (A_{ij} - \bar{A}_{ij})(B_{ij} - \bar{B}_{ij})}{\sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} (A_{ij} - \bar{A}_{ij})^2 (B_{ij} - \bar{B}_{ij})^2} \quad (1)$$

Où : M_i et M_j représentent les tailles (en pixel) de la fenêtre d'interrogation, A_{ij} et B_{ij} sont les distributions des intensités des pixels dans les deux fenêtres d'interrogation. Ce calcul n'est effectué que pour des points b_{ij} inclus dans une fenêtre de recherche définie par l'utilisateur. Une hypothèse stipulant que le déplacement d'écoulement à partir du point a_{ij} pendant l'intervalle de temps δt correspond au maximum de corrélation. Afin d'obtenir une précision de déplacement de l'ordre de 0,2 pixels un ajustement parabolique est utilisé (FORLITI *et al.*, 2000). Les vitesses de surface sont calculées à

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

partir de ces déplacements en les divisant par δt . Le calcul est reproduit de manière itérative sur toute l'image.

On peut calculer le débit d'une section si on connaît le profil bathymétrique de cette section. Le long d'une droite définie par ses deux extrémités, le transect bathymétrique est interpolé à un pas d'espace défini par l'utilisateur. La vitesse de surface est calculée pour chaque pas à partir des vitesses LSPIV les plus proches (dans une zone de recherche définie, avec une pondération de l'éloignement). Un coefficient reliant la vitesse de surface à la vitesse moyennée sur la profondeur pour chaque pas de calcul est défini par l'utilisateur. Le débit est alors estimé par la méthode de la section médiane (RANTZ, 1982).

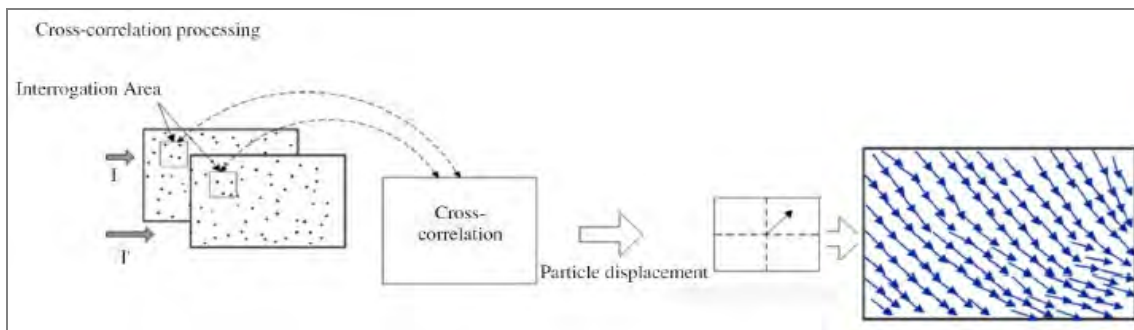


Figure 2. Principe de corrélation croisée (JODEAU, 2013).

4. Application pour la mesure de l'écoulement sur un modèle de bouche de métro.

Dans le cadre des travaux de modélisation des inondations en tunnel en cas de crue de la Seine pour le Plan de Protection des Risques Inondations de la RATP (PPRI), un modèle réduit de bouche de métro est construit sur un canal expérimental à fond plat de 3,5 m de large, 0,8 m de hauteur et 6,5 m de longueur.



Figure 3. Modèle physique de la bouche de métro étudiée.

Les expériences sont donc réalisées sur un modèle réduit d'un débouché d'escalier à une échelle de 1/10. Ce modèle physique instrumenté a pour vocation d'étudier les écoulements à travers une bouche de métro. Le logiciel Fudaa –LSPIV a été utilisé pour mesurer sur le modèle physique la vitesse de l'écoulement pour différentes configurations. Ces vitesses ainsi que la mesure de niveaux d'eau permettent d'obtenir une base de données expérimentales de mesure de débits d'écoulement en fonction de la hauteur d'eau qui pourront ensuite être utilisées comme des conditions aux limites pour la modélisation des inondations dans le réseau RATP.

L'écoulement mesuré représente l'envahissement d'une hauteur d'eau équivalente au pic de la crue historique de 1910 à Paris suite au débordement de la Seine où une hauteur maximale de près de 2,5 m avait envahi certains quartiers de la ville. Une hauteur constante pour chaque scénario avant et après débordement est donc imposée à l'entrée du modèle.

Deux séries d'expériences sont réalisées. Pour chaque configuration, les mesures expérimentales sont comparées avec les résultats issus de calculs numériques. La première série représente un écoulement qui passe uniquement à travers l'escalier. La deuxième série étudie l'écoulement avec débordement lorsque la hauteur d'eau dépasse la hauteur du muret de la bouche de métro. Le tableau ci-dessous récapitule les deux séries d'essais effectués.

Tableau 1. Différents types d'essais réalisés.

N° Série	Symbole	Définition
Série 1	S.B	Configuration sans confinement sans débordement
Série 2	S. A	Configuration sans confinement avec débordement

5. Dispositif expérimental

L'estimation des vitesses par la technique LSPIV dans notre travail est effectuée grâce à une caméra installée sur un mât au-dessus du chariot de déplacement afin d'obtenir une prise de vue en hauteur. Elle est placée au-dessus de l'écoulement et filme la surface de l'eau.

Les mesures des vitesses sont réalisées en imposant des hauteurs d'écoulement à la limite amont du canal jusqu'à établissement d'un régime permanent sur l'ensemble du canal.

Des traceurs bien visibles (bouchons, billes de polystyrène) sont dispersés à la surface d'écoulement. On considère qu'ils se déplacent à la même vitesse que la couche supérieure de l'écoulement.

L'enregistrement des images se fait avec la caméra numérique. Le Logiciel Fudaa-LSPIV prend en entrée des images au format PGM en 256 niveaux de gris. Il faut donc convertir les images dans ce format.

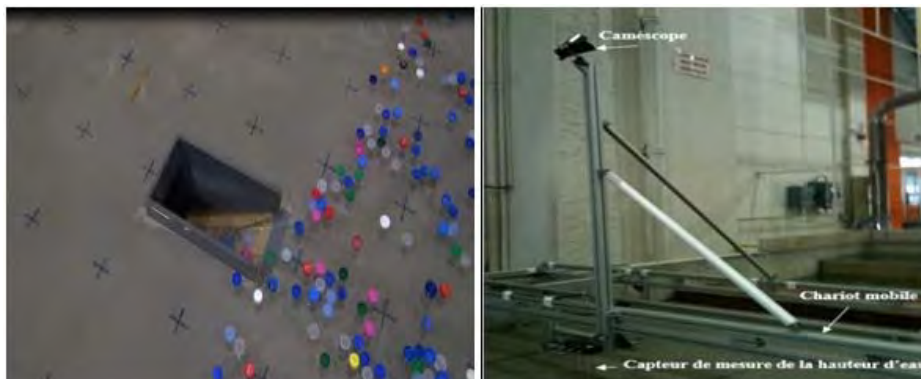


Figure 4. Dispersion des traceurs et emplacement de la caméra aux dessus du chariot mobile.

6. Résultats et interprétation

Les figures 5 et 6 montrent la comparaison des champs de vitesses calculés par un modèle numérique et les champs de vitesses obtenus par LSPIV.

Pour la configuration SB on observe des zones d'accélération à l'entrée de la bouche de métro. Les vitesses les plus fortes sont situées à l'entrée et elles correspondent aux vitesses critiques. Les vitesses d'écoulement diminuent et demeurent constantes le long des trois côtés de la bouche de métro. Sur le seuil nous remarquons que le sens des vecteurs de vitesse numérique correspond à la solution expérimentale.

Concernant la configuration SA, la vitesse de l'écoulement sur le seuil mesurée expérimentalement est différente de celle calculée numériquement sur les côtés de la bouche de métro. Cela peut s'expliquer par la variation de la hauteur d'écoulement sur le pourtour de la bouche de métro, et ainsi par la variation du régime d'écoulement sur celui-ci. En effet l'étude expérimentale avait montré que le nombre de Froude sur le seuil ($Fr = 1.02$) est différent à celui calculé sur les 3 cotés ($Fr = 0.98$).

7. Conclusion

La LSPIV permet de donner quelques informations hydrauliques sur l'écoulement autour d'un modèle réduit de débouché d'accès à une station de métro. Les vitesses de mesures obtenues pour chaque configuration sont globalement correctement prédites par le code Fudaa reflux.

Dans notre travail, nous avons constaté que les résultats de mesure dans certains cas sont sensibles à la variation de régime d'écoulement et au dimension géométrique de l'ouvrage (changement de pente). Certes, il existe un certain bruit au niveau de certains vecteurs schématisés, considérant que cette qualité dépend de la finesse des points de calcul et de la représentation des processus physiques de l'écoulement, mais de manière globale, la méthode LSPIV présente une excellente qualité de résultats.

La technique de LSPIV nous a permis de mesurer le débit d'écoulement entrant dans la bouche de métro en cas de crue de la Seine à partir de la connaissance des vitesses. La

compagne de mesures expérimentales a permis de constituer un important jeu de données de débits d'écoulements dans une bouche de métro. Ces données seront utilisées pour valider la modélisation numérique.

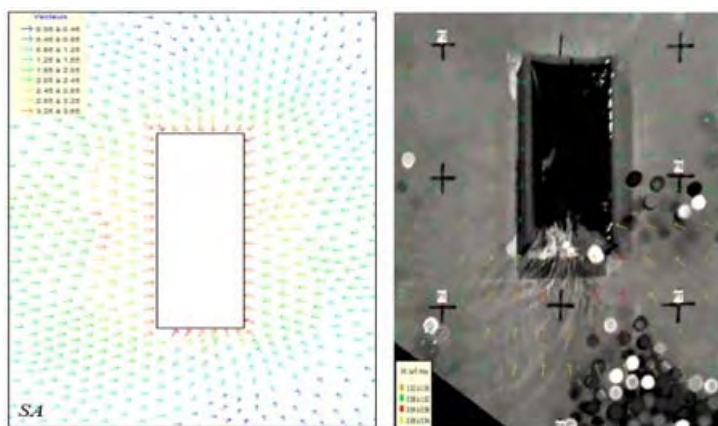


Figure 5. Champs de vitesses numérique et expérimental configurations : SA.

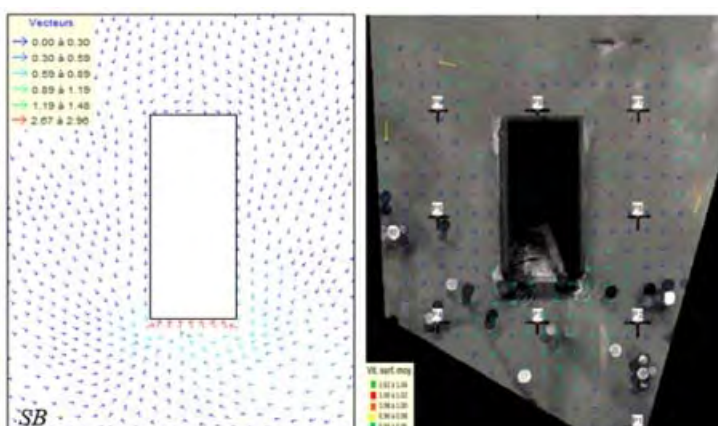


Figure 6. Champs de vitesses numérique et expérimental configurations : SB.

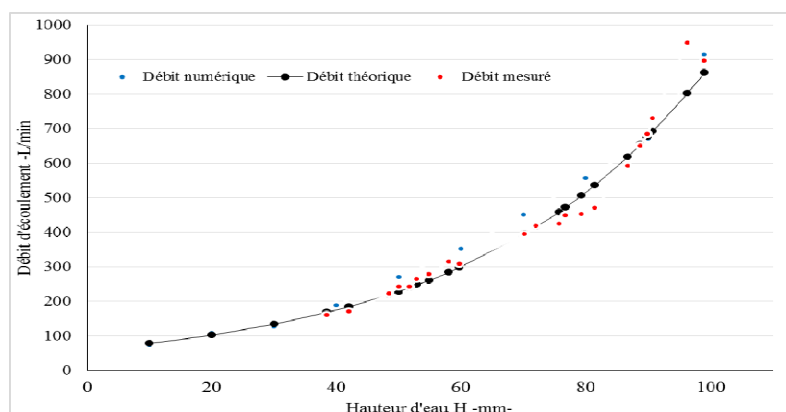


Figure 7. Comparaison des débits d'écoulement pour la configuration SA.

Nomenclature :

EDF	: Électricité de France.
GRP	: Ground Reference Points
IRSTEA	: Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
PPRI	: Plan de Protection des Risques Inondations
RATP	: Régie Autonome des Transports Parisiens.

8. Références Bibliographiques

FORLITI D., STRYKOWSKI P., DEBATIN K. (2000). *Bias and precision errors of digital particle image velocimetry*. Experiments in Fluids, Vol 28(5), pp 436-477.

<http://dx.doi.org/10.1007/s003480050403>

GHOSTINE R. (2009). *Contribution à la résolution numérique des équations de Barré de Saint-Venant bidimensionnelles par une méthode de type éléments finis discontinus : application à la simulation des écoulements au sein des carrefours dans la ville*. Thèse de doctorat, US-INSA-ENGEEES, 450 p.

HAUET A., JODEAU M., LE COZ J., MARCHAND B., MORAN A., LE BOURSICAUD R., DRAMAS G. (2014). *Application de la méthode, LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière*. La Houille Blanche, N° 3, pp 16-22. <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2014024>

HAUET A. (2006). *Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-Scale Particle Image Velocimetry*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble, 305 p.

LE COZ J., HAUET A., PIERREFEU G., DRAMAS G., CAMENEN B. (2010). *Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers*. Journal of Hydrology. Vol. 394, pp 45-52.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.049>

LEGOUT M., DARBOUX F., NEDELEC Y., HAUET A., ESTEVES M., RENAUX B., DENIS H., CORDIER S. (2012). *High Spatial resolution mapping of surface velocities and depths for shallow overland flow*. Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 37(9), pp 984-993. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3220>

MUSTE M., FUJITA I., HAUET A. (2008). *Large Scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments*. Water Resources Research, Vol. 44(4), pp 1-14. <http://dx.doi.org/10.1029/2008wr006950>

RANTZ S. (1982). *Measurement and Computation of Streamflow : Volume 1. Measurement of stage and Discharge*. USGS. 2175.