

## Emploi des profileurs acoustiques à effet Doppler (aDcp) pour étudier la structure des écoulements en rivière

Jérôme Le Coz, André Paquier, Bernard Chastan & Guillaume Dramais

Cemagref  
Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique  
3 bis quai Chauveau, CP 220 F-69336, Lyon Cedex 09, FRANCE  
lecoz@lyon.cemagref.fr

### Résumé :

*Depuis une quinzaine d'années, les profileurs de vitesse acoustiques à effet Doppler (aDcp) sont de plus en plus employés par les équipes hydrométriques pour le jaugeage des cours d'eau. Ces appareils offrent la possibilité d'investiguer la bathymétrie et les vitesses d'écoulement tridimensionnelles rapidement, de manière peu intrusive, sur de vastes domaines et pour une large gamme de conditions de terrain. Le principe de fonctionnement, les stratégies de déploiement et de traitement des données mises en œuvre sont exposés en s'appuyant sur un cas d'étude expérimental : la station hydrométrique « Saint-Georges » sur la Saône à Lyon.*

### Abstract :

*For about fifteen years, the acoustic Doppler current profilers (aDcp) have been increasingly used by hydrometric teams to measure river discharges. Such devices offer opportunities for investigating bed topography and 3-dimensional water velocities: the fast, slightly intrusive measurement procedure can be achieved in large areas, for a wide range of field conditions. This paper reports the principle of operation and the deployment and data post-processing strategies carried out to study an experimental case: the Saint-Georges gauging station (Saône river in Lyon, France).*

### Mots-clefs :

**aDcp ; rivière ; hydrodynamique fluviale**

## 1 Introduction

Un aDcp commercial est généralement constitué de plusieurs transducteurs acoustiques qui émettent dans l'eau des impulsions ultrasonores à fréquence nominale fixée (typiquement, de 300 à 2400  $kHz$ ) et reçoivent le signal rétrodiffusé par les particules en suspension. Le diamètre des céramiques varie typiquement de 2 à 30  $cm$  en fonction des modèles. La configuration usuelle – monostatique, divergente, verticale – est présentée Fig. 1.

L'analyse du décalage fréquentiel Doppler sur des séquences temporelles de l'écho permet d'établir des profils de vitesses d'écoulement radiales. Les vitesses tridimensionnelles sont calculées à partir des composantes radiales ainsi mesurées le long de trois ou quatre faisceaux, sous l'hypothèse d'une homogénéité des vitesses dans la couche horizontale considérée. La distance du fond est déterminée via le temps de retour du pic d'intensité acoustique correspondant.

La grande majorité des jaugeages par aDcp pratiqués en France se font par déploiement mobile (bateau, support flottant, mini-catamaran radio-commandé, etc.), en mode autonome (i.e. sans couplage à un système de positionnement extérieur tel que le GPS, et sans utilisation du cap donné par le compas interne pour le calcul du débit). Le mode de déploiement autonome est rendu possible par le suivi de fond (« bottom-tracking »), i.e. la mesure de la vitesse apparente du fond, toujours par effet Doppler mais via l'envoi d'impulsions de fond spécifiques. Par

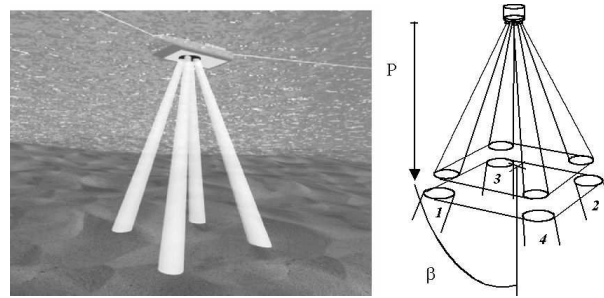


FIG. 1 – Configuration géométrique d'un aDcp monostatique à quatre faisceaux

composition des vitesses, si le fond est immobile, l'appareil connaît à chaque pas de temps de mesure son déplacement dans le référentiel terrestre et donc sa trajectoire. C'est la rapidité et la commodité de cette technique qui font essentiellement le succès de l'aDcp en hydrométrie : 4 à 6 traversées successives de la section suffisent généralement à établir un débit fiable à 5% près, en régime permanent.

Cependant, une stratégie adaptée de déploiement et de post-traitement des données est nécessaire pour obtenir une représentation fidèle et maniable du champ de vitesse moyen. La méthodologie de traitement des données mise en œuvre est présentée et illustrée par le cas d'étude de la station hydrométrique « Saint-Georges ».

## 2 Mesures de vitesse par aDcp mobile autonome

### 2.1 Volume d'échantillonnage et qualité de la mesure

Les principales contraintes techniques des aDcp commerciaux sont la limitation de la portée, principalement due à la dissipation du signal acoustique dans le milieu (typiquement 20 m pour un aDcp à 1 200 kHz); la cadence de mesure (typiquement 3 – 5 Hz maximum) insuffisante pour résoudre les plus petites échelles de turbulence présentes en rivière; l'impossibilité de mesurer dans une zone proche du capteur (de 5 cm à 1 m selon les modèles) et à proximité du fond (typiquement 6% du tirant d'eau, pour un angle d'écartement des faisceaux  $\beta = 20^\circ$ ).

La hauteur des cellules de mesure est définie par l'opérateur (de 10 à 100 cm typiquement, selon la fréquence des ultrasons et le mode de mesure). En fonction du diamètre de la céramique, de la hauteur des cellules et de l'ouverture du faisceau acoustique, le volume d'échantillonnage mesure ainsi de quelques  $cm^3$  à plus de 1000  $cm^3$  (Muste *et al.*, 2004).

Outre les fluctuations turbulentes du champ de vitesse au sein du volume d'échantillonnage, la technique de mesure Doppler introduit une erreur aléatoire assimilable à un écart-type sur les vitesses mesurées. Cette dispersion est inversement proportionnelle à la fréquence des ultrasons, à la taille des cellules, et à la racine carrée du nombre de mesures indépendantes moyennées. Ainsi, dans le cas présenté par la suite (mode WM1, taille de cellule 40 cm), le constructeur indique une dispersion typique de 9 (resp. 18 cm/s) pour un ADCP<sup>®</sup> Teledyne RDI RioGrande à 1 200 kHz (resp. à à 600 kHz).

De manière à réduire ce « bruit Doppler », les mesures élémentaires ont été moyennées par 5, ce qui correspond à un déplacement du bateau petit devant les échelles spatiales des structures d'écoulement. L'erreur aléatoire est donc alors évaluée à environ 4 et 8 cm/s. Une autre façon de la réduire, à taille de cellule donnée, consiste à utiliser un mode de mesure « à impulsions cohérentes » (modes WM 5, 8 et 11). Ces erreurs aléatoires doivent évidemment être distinguées d'un éventuel biais, ou erreur systématique, qui ne pourrait être résorbé par moyennage.

## 2.2 Post-traitement des données brutes

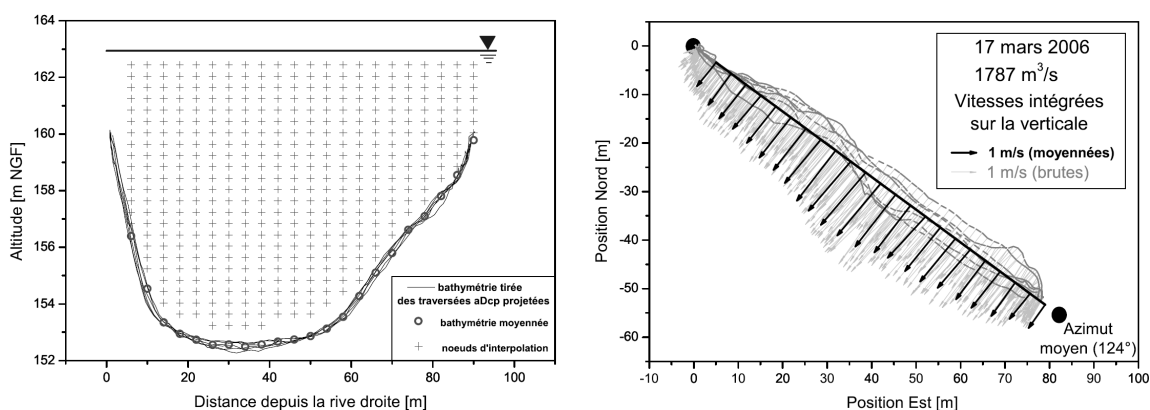


FIG. 2 – Grille d’interpolation pour la série SG12 de 6 traversées aDcp (à gauche)  
Vitesse intégrées sur la verticale pour la série SG14 de 6 traversées aDcp (à droite)

Les données du suivi de fond sont ici utilisées pour calculer la trajectoire de l’aDcp sur chaque traversée, en vérifiant pour chaque campagne l’absence de biais significatif sur le retour à une position fixe après un aller-retour. En l’absence de système de positionnement externe, le raccordement planimétrique peut s’effectuer à partir des distances aux rives relevées par les opérateurs pour chaque traversée. Le raccordement altimétrique est aisé une fois connues précisément la profondeur d’immersion du capteur et la cote de la surface libre. Les tirants d’eau mesurés par les quatre faisceaux sont ici moyennés systématiquement et positionnés au droit de l’appareil, mais il est aussi possible de repositionner les quatre mesures, en tenant compte de l’écartement des faisceaux et des angles d’inclinaison.

Pour pouvoir moyennner les données de vitesse et de bathymétrie issues de traversées successives, il est utile de les projeter et de les moyennner sur une grille régulière, dont les pas d’espace sont adaptés à la résolution des données brutes (Fig. 2). Dans un souci de simplicité, une moyenne pondérée par l’inverse de la distance au nœud d’interpolation a été pratiquée dans le cas d’application présent. Le volume de recherche des voisins dans le plan de projection est ici un rectangle de 0,8 m de haut (soit deux fois le pas vertical) et de 4 m de large (pour une section de 95 m de large). On doit naturellement vérifier que les bathymétries moyennées se superposent convenablement d’une traversée à l’autre.

Un test de sensibilité a été mené sur le nombre de voisins  $N_i$  fixé pour calculer les vitesses moyennes. Dans le cas de « Saint-Georges », un  $N_i$  faible (1, 2, 4) produit des profils mal lissés qui ressemblent aux profils bruts. Pour un  $N_i$  suffisamment élevé (16, 24, 32), les profils moyens se stabilisent indépendamment du nombre de voisins recherchés. Dans ce cas,  $N_i$  a donc été fixé à 32, les données brutes n’étant pas assez denses pour des valeurs supérieures. Lorsque, comme ici, la dispersion des vitesses mesurées est faible et les volumes de recherche plutôt grands, la moyenne pondérée par l’inverse de la distance permet de limiter le lissage spatial.

## 3 Etude de la station hydrométrique Saint-Georges

### 3.1 Contexte et objectifs

Depuis août 2005, la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) suit en continu les débits de la Saône à la station « Saint-Georges » (Lyon) à l’aide d’un aDcp fixe horizontal (H-aDcp). Le H-aDcp mesure en continu (typiquement à la minute) les vitesses d’écoulement horizontales (composantes longitudinale et transversale) le long d’un profil horizontal, sur tout ou partie de

la largeur de la section de rivière. Pour calculer le débit total, des profils verticaux théoriques sont calés sur les mesures ponctuelles de vitesse à la cote d'échantillonnage fixe du H-aDcp. En l'occurrence, le profil théorique unitaire utilisé (VISEA-H Manual, 2003; Van Rijn, 1986) est une combinaison linéaire de la loi logarithmique et d'un profil dérivé de la loi de sillage (Coles, 1956) :

$$\frac{u_x}{u_1} = A_1 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \left[1 - A_1 \cdot \ln\left(\frac{h_0}{z_0}\right)\right] \cdot \left[2\left(\frac{z - z_0}{h_0 - z_0}\right)^t - \left(\frac{z - z_0}{h_0 - z_0}\right)^{2t}\right] \quad (1)$$

avec  $u_x$  la vitesse d'écoulement mesurée à la cote  $z = x \cdot h_0$  au-dessus du fond,  $h_0$  le tirant d'eau,  $u_1$  la vitesse en surface,  $z_0$  la cote d'annulation de la vitesse et  $t$  un paramètre calculé tel que  $u_{0,5}$  est constante quelle que soit la valeur du coefficient  $A_1$ .

En pratique, il faut donc estimer les deux paramètres  $z_0$  et  $A_1$ , la valeur de ce dernier pilotant l'écart au profil logarithmique pur (obtenu pour  $A_1 = 1/\ln\left(\frac{h_0}{z_0}\right)$ ). L'examen des profils de vitesse expérimentaux obtenus lors des campagnes de jaugeage a permis de caler ces paramètres et de tester la validité du profil théorique retenu pour des conditions d'écoulement contrastées et pour l'ensemble de la section.

### 3.2 Jeu de jaugeages aDcp traités

Les jaugeages aDcp ont été pratiqués selon le protocole suivi par la CNR, le débit expérimental  $Q_{CNR}$  étant établi comme la moyenne des débits obtenus lors de 6 (parfois 7) traversées successives de la rivière. Les profileurs sont des RioGrande TRDI à 600 ou 1200 kHz (paramétrage WM1, BM5, WS40, BP4, WP5). La cote à l'échelle est régulièrement relevée par les opérateurs lors du jaugeage.

Pendant la succession de coups d'eau du printemps 2006, 18 jaugeages par aDcp ont été réalisés à « Saint-Georges » du 15 février au 3 mai (Fig. 1). La gamme de débits ainsi investiguée va de 100 à 1800 m<sup>3</sup>/s. Il a été vérifié que pendant les 18 séries de traversées retenues pour l'étude, les conditions hydrodynamiques sont stables (débits aDcp, vitesse enregistrée par le H-aDcp, cotes lues et enregistrées par la station). En outre, les trajectoires en plan et les profils bathymétriques se superposent correctement (Fig. 2).

Code	Date	Equipe	Opérateur	aDcp	Nombre de traversées	Durée	Cote eau [m NGF]	Q_CNR [m3/s]	Q_ref [m3/s]	Q_diff [%]
SG1	2006/02/15	CNR	NJ	WH1200	6	00:14	162,05	115	117	1,4
SG2	2006/02/16	CNR	NJ	WH1200	6	00:15	162,09	246	245	-0,5
SG3	2006/02/16	CNR	NJ	WH1200	6	00:13	162,13	317	319	0,8
SG4	2006/02/17	CNR	XM	WH1200	6	00:19	161,94	512	518	1,2
SG5	2006/02/18	CNR	JL	WH600	6	00:22	162,23	902	894	-0,9
SG6	2006/02/19	CNR	XM	WH600	6	00:18	162,39	1068	1063	-0,5
SG7	2006/02/20	CNR	XM	WH600	6	00:15	162,65	1242	1235	-0,5
SG8	2006/02/21	Cem.	GD	WH1200	6	00:20	162,75	1347	1326	-1,5
SG9	2006/02/22	CNR	XM	WH600	6	00:24	162,73	1335	1333	-0,2
SG10	2006/02/27	CNR	NJ	WH600	6	00:16	162,19	510	508	-0,3
SG11	2006/03/10	CNR	XM	WH600	6	00:19	162,62	1352	1347	-0,3
SG12	2006/03/13	CNR	NJ	WH600	6	00:14	162,94	1580	1585	0,3
SG13	2006/03/15	CNR	NJ	WH600	6	00:26	163,16	1768	1744	-1,4
SG14	2006/03/17	CNR	NJ	WH600	6	00:18	163,21	1787	1740	-2,6
SG15	2006/03/23	CNR	NJ	WH600	6	00:21	162,09	692	690	-0,3
SG16	2006/03/27	CNR	NJ	WH600	7	00:32	162,44	1035	1029	-0,6
SG17	2006/04/03	CNR	NJ	WH600	7	00:19	162,81	1552	1565	0,8
SG18	2006/05/03	CNR	NJ	WH600	6	01:00	162,06	262	263	0,5

TAB. 1 – Caractéristiques des séries aDcp traitées

Pour chaque traversée, les données brutes de vitesse et de profondeur ont été positionnées et moyennées selon la méthodologie exposée au § 2.2. On dispose ainsi de 414 profils moyens : 23 verticales espacées de 4 m en travers de la section, pour 18 jeux de conditions hydrodynamiques.

Sur chaque profil vertical moyen, la vitesse intégrée sur la profondeur  $\langle u \rangle_{ref}$  est calculée selon la même procédure que pour le jaugeage en routine (calcul identique à celui implémenté dans le logiciel WinRiver1.06, avec la configuration utilisée par la CNR). En particulier, le débit unitaire non mesuré près de la surface (resp. près du fond) est estimé par extrapolation constante (resp. par calage d'une loi puissance en  $1/6$ ). La Fig. 2 présente un exemple de vitesses (brutes et moyennées) intégrées sur la verticale de cette manière, pour une série de traversées aDcp.

Le débit total mesuré est simplement calculé comme la somme des débits unitaires multipliés par le pas d'espace transversal (4 m ici), i.e. par la méthode des rectangles. Les débits résiduels près des bords sont estimés par la formule semi-empirique de l'USGS implémentée dans WinRiver1.06 (Simpson, 2001). Afin de contrôler la validité du post-traitement, les débits ainsi obtenus ( $Q_{ref}$ ) ont été comparés aux débits moyens expérimentaux ( $Q_{CNR}$ ). Comme l'erreur relative ( $Q_{diff}$ ) est faible (typiquement inférieure à 1%) pour une erreur moyenne sur les 18 séries de  $-0,3\%$  (Tab. 1),  $\langle u \rangle_{ref}$  est conservée comme la vitesse intégrée de référence.

### 3.3 Caractérisation des profils verticaux

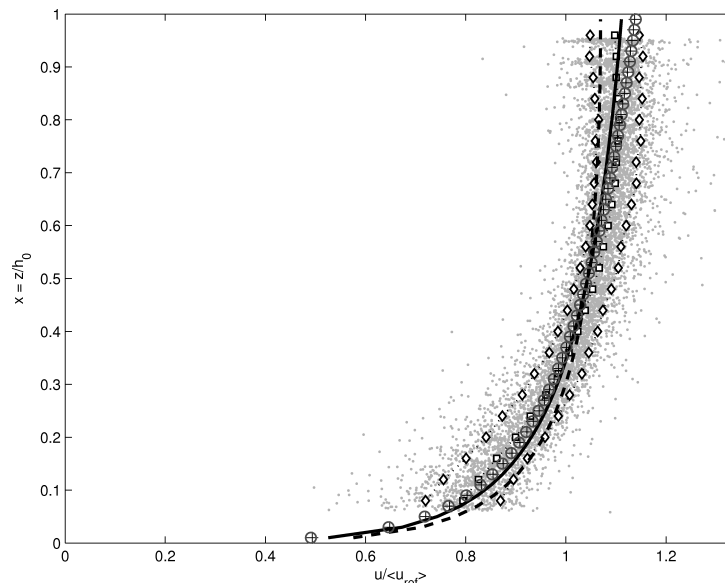


FIG. 3 – Profils expérimentaux adimensionnels (points) sur l'ensemble du jeu de données. Profil moyen (carrés),  $\pm$  un écart-type (diamants), et modélisation par profil log (ronds) et par profils de Van Rijn pour  $A_1 = 0,12$  (croix);  $0,075$  (ligne pleine);  $0$  (ligne pointillée)

L'objectif principal de l'étude consiste à définir un profil de vitesse unitaire expérimental utilisable pour le suivi opérationnel des débits. A cet effet, les 414 profils expérimentaux sont adimensionnalisés ( $x = z/h_0$ ,  $u' = u / \langle u \rangle_{ref}$ ). Le nuage de points obtenu est présenté Fig. 3. La moyenne et l'écart-type expérimental de  $u'$  ont été calculés sur des segments verticaux de taille  $0,04$ . Les profils correspondants sont également tracés.

La dispersion des données augmente près du fond et de la surface libre, mais l'écart-type est inférieur à  $0,08$  sur toute la colonne d'eau, et inférieur à  $0,05$  pour  $0,25 < x < 0,90$ . Le coefficient de surface expérimental  $\alpha = \langle u \rangle_{ref} / u_1 = 1 / u'_1$  vaut  $0,91 \pm 0,04$ , valeur sensiblement supérieure au coefficient moyen usuellement considéré ( $0,85$ ).

Un profil logarithmique pur a été calé par régression linéaire sur l'ensemble du nuage de points (Fig. 3). Il reproduit correctement (à moins de  $0,02$  près) le profil expérimental moyen jusqu'à  $x = 0,85$  mais en surestime significativement la partie supérieure, plutôt constante

( $\alpha_{log} = 0,88$ ). Ce profil logarithmique calé est unitaire ( $\langle u \rangle_{log} = 1,000$ ) et fournit une estimation de  $z_0$  à  $0,0025\text{ m}$ , en considérant un  $h_0$  moyen de  $8,09\text{ m}$ .

En conservant cette estimation de  $z_0$ , un calage manuel du paramètre  $A_1$  peut être effectué pour représenter les données par un profil de Van Rijn adimensionnel  $\langle u_x \rangle$  :

$$\frac{\langle u_x \rangle}{u_1} = A_1 \cdot \left[ -1 + \ln \left( \frac{h_0}{z_0} \right) \right] + \left[ 1 - A_1 \cdot \ln \left( \frac{h_0}{z_0} \right) \right] \cdot \left[ \frac{3t + 1}{2t^2 + 3t + 1} \right] \quad (2)$$

Comme attendu,  $A_1 = 1/\ln(h_0/z_0) = 0,12$  reproduit le calage logarithmique pur. Un meilleur calage sur toute la hauteur d'eau est obtenu avec  $A_1 = 0,075$ , mais le profil résultant surestime légèrement le bas du profil expérimental moyen. Le profil perturbatoire pur ( $A_1 = 0$ ) est également tracé sur la Fig. 3.

Les profils unitaires pour  $A_1 = [0,12; 0,075; 0]$  ont été testés pour simuler une estimation de débit telle qu'elle est réalisée par le H-aDcp : pour chaque point de mesure, à la cote d'échantillonnage réelle, la vitesse du profil moyen mesuré par aDcp est utilisée pour dilater le profil théorique unitaire. Les estimations de débit sont ensuite confrontées au débit total mesuré par aDcp. Les estimations fondées sur le profil log pur ( $A_1 = 0,12$ ) et le profil calé ( $A_1 = 0,075$ ) sont très satisfaisantes (exactes à moins de 3% près). Le profil perturbatoire pur ( $A_1 = 0$ ) donne des résultats corrects pour un suivi hydrométrique mais présente un biais positif autour de 5%.

## 4 Conclusion

La généralisation des aDcp en hydrométrie offre des opportunités accrues d'investigation de la structure des écoulements dans les systèmes fluviaux. Toutefois, l'établissement et l'analyse des champs de vitesse moyenne tridimensionnelle nécessitent un effort parallèle de développement d'outils de post-traitement adaptés et de réflexion sur les moyennes spatiales et temporelles introduites. Le cas de la station hydrométrique « Saint-Georges » illustre l'intérêt de telles données expérimentales pour les questions d'hydraulique fluviale opérationnelle.

## 5 Remerciements

L'étude présentée ici a été rendue possible par le concours de l'équipe hydrométrique de la CNR dirigée par G. Pierrefeu, et de l'équipe métrologie de l'UR HHLy, renforcée de P. Roger (Cemagref).

## Références

- Coles, D. 1956 The law of the wake in the turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.* **1** 191-226
- Muste, M., Yu, K., Spasojevic, M. 2004 Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics ; Part I : moving-vessel measurements. *Flow Meas. Instr.* **15** 1-16
- Simpson, M.R. 2001 Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler. *Rapport technique USGS*
- Van Rijn, L. 1986 Mathematical modeling of suspended sediment in non uniform flows. *J. Hydr. Eng.* **112(6)** 433-455
- WISEA-H Manual 2003 Version 2.xx. *Aqua Vision BV, The Netherlands*