



**HAL**  
open science

## Utilisation des mesures sans contact pour quantifier le débit des rivières torrentielles

Guillaume Dramais, J. Le Coz, B. Camenen, A. Hauet, P. Duby

► **To cite this version:**

Guillaume Dramais, J. Le Coz, B. Camenen, A. Hauet, P. Duby. Utilisation des mesures sans contact pour quantifier le débit des rivières torrentielles. Colloque de la Société Hydrotechnique de France, "Eaux en montagne", Mar 2011, Lyon, France. 8 p. hal-00593492

**HAL Id: hal-00593492**

**<https://hal.science/hal-00593492>**

Submitted on 16 May 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# UTILISATION DES MESURES SANS CONTACT POUR QUANTIFIER LE DEBIT DES RIVIERES TORRENTIELLES

## *Use of non-contact methods for mountain stream discharge measurements*

**Guillaume DRAMAIS, Jérôme LE COZ, Benoît CAMENEN**

Cemagref de Lyon, Unité de Recherche Hydrologie Hydraulique  
3 bis Quai Chauveau, 69336 Lyon cedex 09  
e-mail: [guillaume.dramais@cemagref.fr](mailto:guillaume.dramais@cemagref.fr)

**Alexandre HAUET**

Electricité de France, Direction technique Générale  
62 bis rue Raymond IV, 31000 Toulouse  
e-mail: [alexandre.huet@edf.fr](mailto:alexandre.huet@edf.fr)

**Patrick DUBY**

Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement – Rhône Alpes  
208 bis, rue Garibaldi 69422 Lyon  
e-mail: [Patrick.DUBY@developpement-durable.gouv.fr](mailto:Patrick.DUBY@developpement-durable.gouv.fr)

*La mesure du débit des torrents et rivières torrentielles est très complexe : en étiage il est difficile de trouver des sections de mesure bien adaptées aux techniques traditionnelles (moulinets, ADCP...) et en crue, ces mêmes techniques sont limitées par les vitesses trop importantes et le transport solide en surface ou en suspension. Depuis 2005, l'équipe métrologie du Cemagref de Lyon étudie les chasses de la chaîne de barrages EDF sur l'Arc en Maurienne. Ces événements contrôlés et leur suivi sont particulièrement adaptés au développement et à la validation de nouvelles techniques de mesure du débit, pour être ensuite déployées en crue.*

*Les deux techniques présentées et testées dans cette étude sont des mesures de vitesse de surface sans contact par analyse d'image et par radar. A partir des jeux de données de vitesses de surface et de mesures complémentaires (section mouillée, mesures de profils de vitesse), un coefficient de vitesse est déterminé pour évaluer la vitesse moyenne dans la section instrumentée. La vitesse moyenne et la section mouillée nous permettent ensuite de calculer le débit. L'événement étudié permet de valider ces méthodes de mesure. Ces techniques permettent de réduire l'incertitude considérable qui affecte souvent les hydrogrammes de crue sur les torrents et rivières torrentielles.*

*Discharge measurement in mountain streams is difficult: during low water it isn't easy to find good gaging sections and during floods traditional methods are limited by high velocities, floating objects and suspended load sediments. Since 2005, the hydrometric team from Cemagref Lyon has been studying an annual dam flush on a mountain stream in the French Alps. This kind of flow controlled events are very interesting for trying and improving new discharge measurements techniques.*

*Techniques presented in this study are non-contact surface velocity measurement solutions: LSPIV, an image based method, and a microwave radar method. Other measurements are needed for discharge computing (bathymetry, velocity profiles), a velocity coefficient is calculated for each site. Mean velocity and surface velocity are linked with this coefficient. The measurement of the wetted area is the last step before computing the flow. Both non-contact methods presented in this paper increase the knowledge of high flows in torrents and could reduce the uncertainty on flood hydrograph.*

## I INTRODUCTION

La bonne connaissance des débits des rivières montagneuses est stratégique pour la sécurité des personnes et des biens mais aussi pour la gestion de la ressource en eau. La qualité de ces données a un impact direct sur le dimensionnement des ouvrages de protection, la cartographie des risques, les dispositifs d'alerte. Il est donc très important d'arriver à mesurer ces débits en maîtrisant les incertitudes. Les techniques traditionnelles (moulinet, ADCP, courantomètres électromagnétiques ou acoustiques) trouvent souvent leurs limites dans ces écoulements rapides, très chargés en matières en suspension, ces cours d'eau offrent rarement des sections de jaugeage stables autant en largeur qu'en profondeur.

Les jaugeages par dilution de traceur (sel, rhodamine, fluorescéine...) sont souvent utilisés dans ces cours d'eau mais atteignent aussi leurs limites en crue (volume à injecter, adsorption du traceur par les matières en

suspension). Les mesures sans contact peuvent alors devenir de bonnes solutions pour estimer les débits de ces torrents où les vitesses sont souvent considérables et mettent en danger les jaugeurs et leur matériel. Dans cette étude nous présentons deux techniques et leur déploiement appliqués sur l'Arc en Maurienne dans les Alpes françaises.

## II MATERIEL ET METHODES

### II.1 SITES D'ETUDE

L'Arc en Maurienne est un affluent rive gauche de l'Isère au caractère torrentiel marqué. Le bassin versant de l'Arc couvre 1 957 km<sup>2</sup>. La pente du lit varie entre 0,5 et 6 % [1]. L'Arc est une rivière très contrainte car située dans une vallée industrielle encaissée où passent plusieurs réseaux routiers et ferroviaires. Le débit est régulé par une importante infrastructure hydroélectrique. L'Arc est étudié dans le cadre de la ZABR.(Zone Atelier Bassin du Rhône). Les résultats présentés dans cette étude sont issus de la chasse des barrages de la vallée de la Maurienne 2010. Les mesures sont réalisées au niveau du limnimètre de Saint Avre qui a été mis en place en 2005. Il est constitué d'un capteur de hauteur d'eau bulle à bulle et d'une centrale d'acquisition télétransmise. La station de Pontamafrey est une station hydrométrique située juste en amont de Saint Avre ; sa courbe de tarage est suivie par EDF-DTG et constitue la courbe de référence pour l'Arc.

### II.2 INSTRUMENTATION ET MESURES

#### II.2.1 Techniques de mesures sans contact

Inspirée de la méthode dite des flotteurs, la LSPIV (pour Large Scale Particle Image Velocimetry) est étendue du laboratoire aux rivières à la fin des années 90 par [2], cette technique de mesure des vitesses de surface a été testée et validée par plusieurs équipes dans différentes configurations d'écoulement. Les travaux de [3], [4], [5], [6], décrivent les algorithmes de calcul et les déploiements fixes et mobiles testés sur différents cours d'eau. L'hydrométrie par analyse d'images consiste à reconnaître, de manière statistique, le déplacement de formes visibles (traceurs de l'écoulement) sur deux images successives. L'analyse d'images permet de mesurer le champ 2D de vitesse en surface d'un écoulement à condition que des traceurs visibles, tels que des particules solides, des bulles ou des figures de turbulence soient advectées avec l'écoulement. Une mesure LSPIV comprend 4 étapes : (1) L'enregistrement d'une séquence d'images horodatées de l'écoulement par une caméra ou un appareil photo fixe permettant une connaissance très fine de l'intervalle de temps entre les images ; (2) Une correction géométrique des images pour s'affranchir des effets de distorsion de perspective (ortho-rectification), réalisée par mesure topographique de cibles présentes dans l'image lors de la mise en place de la caméra ; (3) Un calcul du déplacement des traceurs de l'écoulement grâce à une analyse statistique en corrélation des motifs ; (4) La correction des vecteurs erronés et vérification de la qualité des vecteurs. Les trois dernières étapes sont implémentées dans les codes de calculs LSPIV.

Les mesures par radar peuvent avoir plusieurs applications en rivière, la plus répandue étant la mesure de hauteur d'eau sans contact : on mesure la distance de l'interface air/eau depuis un point fixe, en général un pont. Le principe de mesure du capteur est d'émettre des impulsions (ondes électromagnétiques) très courtes, et de mesurer ensuite le temps écoulé entre l'émission et le retour du signal. La plupart de ces capteurs émettent dans les bandes de fréquence ISM (Industriel, Scientifique, et Médical). Les radars pénétrants [7] (UHF ou VHF avec des fréquences de l'ordre de 100 Mégahertz) peuvent être utilisés pour estimer la bathymétrie du cours d'eau. Ces radars sont déplacés sur un transect depuis un pont ou un câble porteur et peuvent explorer des cours d'eau jusqu'à 6m de profondeur pour une eau de conductivité électrique faible (100µS/cm). La profondeur de pénétration va diminuer avec l'augmentation de la conductivité électrique. Pour la mesure de vitesse, [7] identifie trois autres types de radar. Le radar testé dans cette étude est un capteur Ott Kalesto utilisant la technologie FMCW (Frequency Modulated Continuous Waves) de fréquence 24.1 GHz. Les ondes émises par le radar sont réfléchies par la rugosité de la surface de l'écoulement, la fréquence rétrodiffusée est alors modifiée proportionnellement à la vitesse de l'écoulement, selon un décalage Doppler. Deux grandeurs sont mesurées : la vitesse de surface en m/s et le gain en dB. Le gain correspond à l'intensité du signal réceptionné et permet de valider la mesure de vitesse. La valeur de gain doit être supérieure à 50 dB pour que la valeur de vitesse soit cohérente [8]. La figure 1a représente les vitesses et le gain mesurés depuis un point fixe par le radar pendant la chasse 2010, (les deux parties de la courbe sans points correspondent aux deux jaugeages mobiles). On remarque que le gain est stable pendant

toute la journée. Sur d'autres sites la diminution ou l'augmentation du débit entraîne une surface libre moins rugueuse qui peut faire chuter le gain et dégrader les mesures de vitesse. La figure 1b illustre ce phénomène. On remarque une chute brutale du gain vers 17h20, les vitesses deviennent alors très bruitées et très fortes alors que la surface libre est de plus en plus lisse et les vitesses plus lentes (cet exemple est issu de tests réalisés lors d'une campagne de mesure sur le Rhône à Surjoux, au pont de Pyrimont).

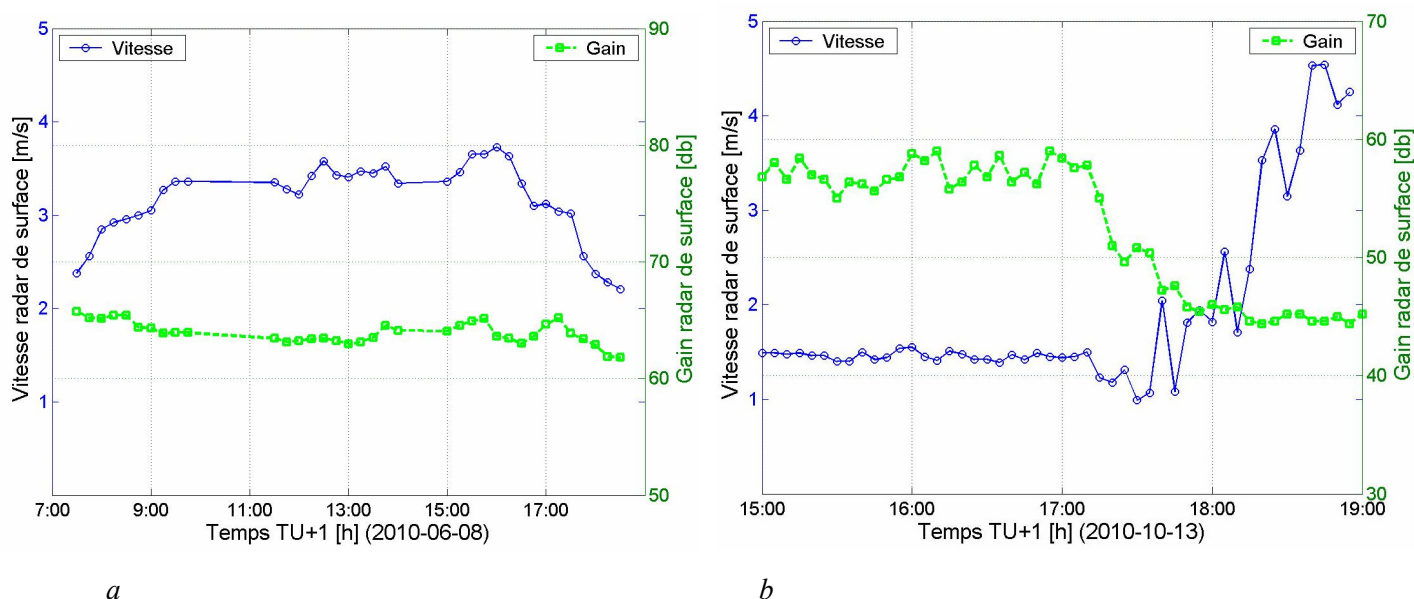


Fig. 1 : Vitesses de surface et gain mesurés par le radar a (Chasse de l'Arc 2010) b (Surjoux 2010)

Pour mesurer correctement la vitesse de l'écoulement le niveau de signal reçu doit donc être suffisant. Pour cela la longueur d'onde des vaguelettes résonantes doit respecter la condition de Bragg [7].

$$\lambda_b = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

Avec :

$\lambda_b$  : la longueur d'onde des vagues résonantes,

$\lambda$  : la longueur d'onde du radar,

$\theta$  : l'angle incident (mesuré par rapport à l'horizontale).

Dans le cas du radar Kalesto les vagues résonantes doivent avoir une longueur d'onde de 0.9 cm pour un angle de 45°. Si on diminue l'angle incident la longueur d'onde augmente jusqu'à 1.2 cm, si on l'augmente jusqu'à 60° la longueur d'onde diminue jusqu'à 0.7 cm. Plus on augmente l'angle plus la taille de la fenêtre de mesure diminue, la distance entre le capteur et la surface de l'eau diminue également. Il faut donc trouver suivant le site la position la plus appropriée. Dans le cas des mesures au radar Kalesto la position idéale sera celle qui permet d'obtenir le gain le plus fort. Les réflexions sont plus importantes lorsqu'on se rapproche d'une position normale à la surface libre, soit en augmentant l'angle incident.

Pour une application débitmétrique, ces deux méthodes de mesures nécessitent trois hypothèses. Premièrement les débris, motifs et vaguelettes présentes à la surface de l'écoulement se déplacent à la même vitesse que l'eau en surface. La seconde hypothèse est que l'on peut relier un champ de vitesse mesuré en surface à la vitesse moyenne dans la section. De plus ces deux méthodes peuvent être fortement perturbées par le vent qui modifie largement la rugosité et les déplacements en surface de l'écoulement. La troisième hypothèse est l'invariance et la connaissance de la bathymétrie pendant les mesures (voir la section II.2.3).

### II.2.2 Déploiement sur le terrain

Le matériel déployé pour réaliser les mesures en LSPIV mobile consiste en une camera numérique fixée soit sur un trépied soit sur le haut d'un mât de mesure à une plate-forme mobile commandée depuis le sol. Il est nécessaire avant chaque prise de vue depuis une nouvelle position de faire des mesures de topographie pour rectifier les images et permettre des calculs dans le repère métrique. La figure 2b montre l'angle de vue LSPIV et le positionnement d'un point d'ancrage à l'aide d'une station totale. La figure 2c est une image

ortho-rectifiée sur laquelle sont positionnés le transect de mesure, les vecteurs vitesses projetés ainsi que les points d’ancrage.

Pour les mesures radar mobile, le capteur déployé est le radar Kalesto (cf. II.1.1) fixé sur un support adaptable à des rambardes de pont de différentes tailles (Figure 2a). Ce type de capteur peut aussi être déployé depuis d’autres supports (câbles porteurs, cyclopotences). Le radar communique en RS485 avec une centrale d’acquisition qui permet les réglages habituels. Il est indispensable de mesurer l’angle du capteur par rapport à l’horizontale. Une fois paramétré, le radar est déplacé sur des verticales successives réparties dans la section conformément aux recommandations de la norme ISO EN 748 [9].

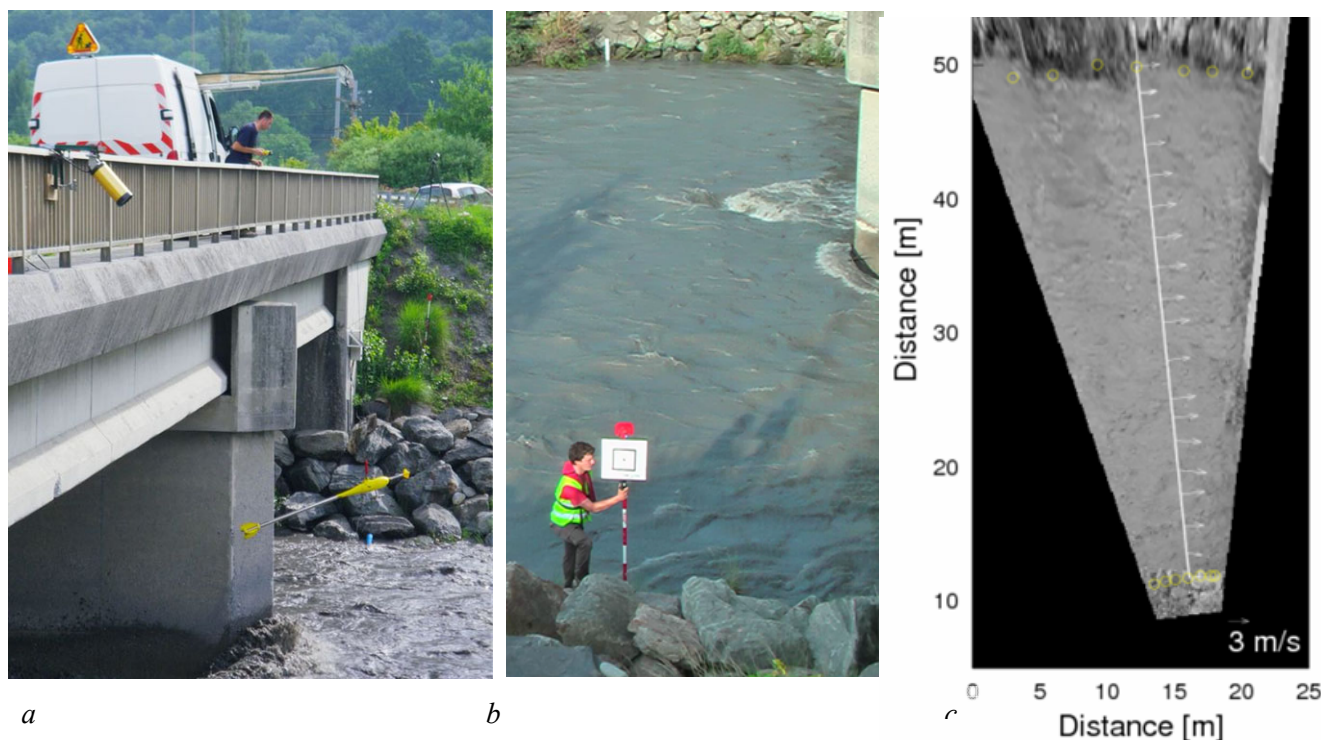


Fig. 2 : a : Déploiement des mesures simultanées lors de la chasse de l’Arc (juin 2010). b : Mesure des points d’ancrage LSPIV dans une image brute. c : Image ortho-rectifiée et transect de mesure LSPIV.

### II.2.3 Bathymétrie et suivi de la hauteur d’eau

La topographie des sections des torrents est très changeante lors des événements importants et il est indispensable de mesurer la géométrie des transects régulièrement. L’évolution de la bathymétrie engendre une incertitude sur les mesures de débit. Sur le site d’étude, la bathymétrie est mesurée à l’étiage, à pied, à l’aide d’une station totale et d’un GPS différentiel. Pour l’étude de la chasse de 2010, la bathymétrie retenue est celle déterminée par le camion jaugeur au droit de l’amont du pont.

Le suivi fin des variations de hauteur d’eau pendant les mesures est également très important afin de bien évaluer la section mouillée et d’orthorectifier correctement les images LSPIV. Elle est mesurée par la station limnimétrique de Saint Avre et par mesures topographiques.

## II.3 TRAITEMENT DES DONNEES

### II.3.1 Champs de vitesse de surface

Pendant la chasse 2010, les champs de vitesse de surface sont mesurés simultanément par trois méthodes en amont du pont de St Avre. Un saumon de 80 kg avec un moulinet est déployé par camion hydrométrique (Figure 2a). Sur les mêmes verticales, le radar est positionné juste après le passage du camion jaugeur, et enfin deux séquences vidéo de quelques secondes sont enregistrées pendant le jaugeage. Cette opération est répétée pour deux débits différents. Les figures 3a et 3b montrent l’intensité des vitesses de surface le long de la section de mesure. Une pile de pont se situe entre 23 et 25 m. Les transects de mesure radar et LSPIV sont situés 5 mètres en amont du pont.

On observe des écarts entre les trois méthodes qui sont inévitables lors de la mesure d’écoulements aussi rapides et complexes. La forme du champ de vitesse et l’intensité des vitesses restent très proches pour les deux jaugeages. C’est la vitesse de surface mesurée au saumon qui est la plus dispersée, ce qui est sans doute

dû au fait que le moulinet sort de l'écoulement à certains moments ; les vitesses sont alors surestimées car l'hélice ne rencontre plus de résistance et tourne donc plus vite. La vitesse de surface « saumon théorique » est recalculée à partir des profils de vitesses : une vitesse moyenne est calculée par la méthode algébrique à 3 points [9] puis le coefficient de vitesse déterminé en II.3.2 est ensuite appliqué à chaque vitesse moyenne. Cette courbe s'aligne mieux avec les autres et permet de simuler une vitesse de surface.

On observe des écarts de moins de 1% à plus de 100% sur les vitesses à proximité de la pile de pont, dans les 2 cas. La moyenne des écarts est de 3% mais la dispersion est assez importante. On voit que la pile de pont influence et perturbe le champ de vitesse surtout pour les mesures au moulinet qui sont les plus proches de la pile situé entre 23 et 25 m..

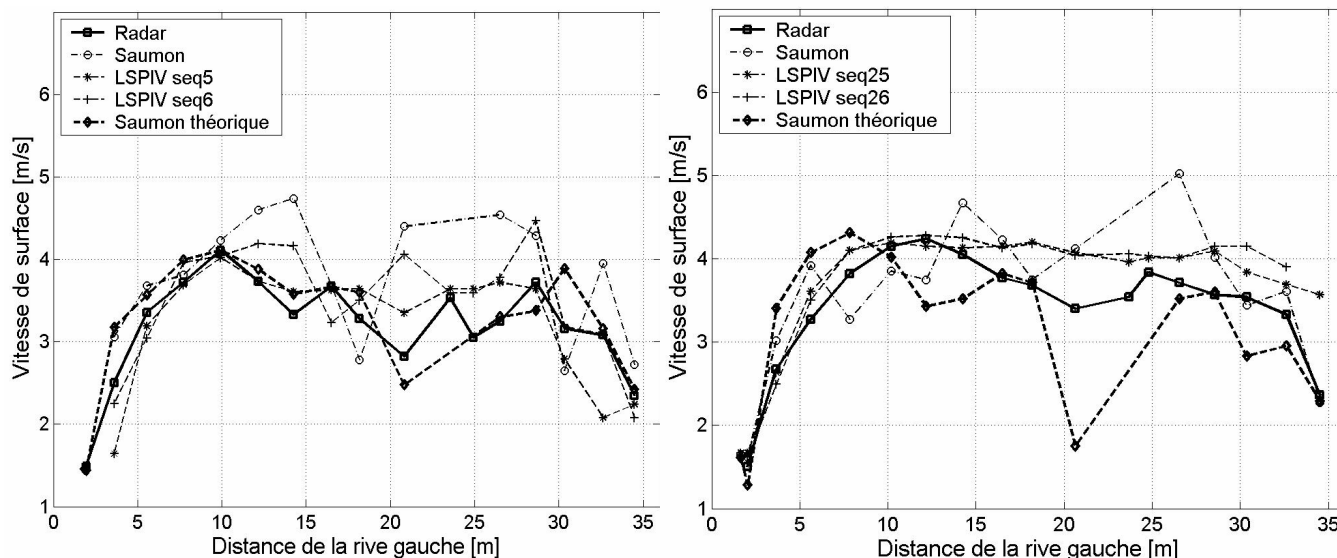


Fig 3a : Profils de vitesse de surface : Jaugeage B Fig 3b : Profils de vitesse de surface : Jaugeage C

### II.3.2 Coefficient de vitesse

Les mesures LSPIV et radar permettent la mesure du champ de vitesse à la surface de l'écoulement. Pour calculer un débit, on doit utiliser un modèle de distribution verticale des vitesses pour calculer une vitesse moyenne sur la hauteur d'eau à partir de cette vitesse de surface. On suppose que la distribution verticale des vitesses suit une loi logarithmique ou de façon équivalente une loi puissance en  $1/m$  (avec  $m = 4$  à  $10$  typiquement), d'où un rapport entre la vitesse moyenne et la vitesse de surface nommé  $\alpha$  généralement évalué entre 0.80 pour les rivières au fond rugueux et 0.90 pour des chenaux profonds à fond plus lisse. La valeur 0.85 est souvent utilisée en rivière naturelle [10]. Ce coefficient peut être déterminé à partir des profils de vitesses mesurés au moulinet. La figure 4a montre les profils de vitesse moulinet de la chasse de 2010, avec  $h$  la hauteur d'eau sur la verticale,  $z$  la position de la mesure,  $V_m$  la vitesse moyenne et  $V$  la vitesse mesurée localement. La courbe pointillée représente le profil logarithmique théorique, et la courbe pleine est tronquée à  $0.7h$  avec une vitesse constante appliquée au dessus de  $0.7h$ . L'étude de ces profils rendus adimensionnels nous permet d'estimer un coefficient compris entre 0.72 et 0.79. Sur le même site un coefficient de 0.76 avait été déterminé pour les événements de 2008 et 2009 [11]. Nous retiendrons cette valeur pour les estimations de débit de la partie III. Pour des événements antérieurs sur le même site, [12] avait évalué un coefficient de 0.79 en prenant en compte les profils de vitesse à haut et bas débits sur plusieurs sections de jaugeage du site de Saint Avre. Par une analyse similaire de profils de vitesse ADCP, [13] et [14] ont déterminé des coefficients de 0.90 pour l'Ardèche à Saint Martin d'Ardèche, et de 0.91 pour la Saône à Lyon.

Sans étudier précisément les profils de vitesse on peut déterminer le coefficient  $\alpha$  en effectuant des jaugeages traditionnels simultanément aux mesures radar. On considère alors que le débit mesuré par la méthode traditionnelle est la valeur vraie. On peut alors relier la vitesse moyenne à la vitesse de surface en utilisant une formule simple. La formule simplifiée du débit étant :

$$Q = V_m \times S \quad (2)$$

avec  $Q$  le débit total en  $m^3/s$  mesuré avec une méthode classique,  $V_m$  la vitesse moyenne en  $m/s$  et  $S$  la surface mouillée en  $m^2$ .

Soit le coefficient  $\alpha$  qui relie la vitesse moyenne  $V_r$  issue des mesures de surface mesurées par le radar à la vitesse moyenne  $V_m$  par :

$$\alpha = \frac{V_m}{V_r} \quad (3)$$

On obtient :

$$Q = V_r \times \alpha \times S \quad (4)$$

La vitesse de surface  $V_r$ , étendue à la section de jaugeage peut être déterminée en appliquant simplement les vitesses radar à des verticales successives dans un logiciel de dépouillement de jaugeage. Ensuite le coefficient peut être calculé. Il est ensuite appliqué pour chaque mesure de vitesse radar dans ces mêmes logiciels pour déterminer la vitesse moyenne corrigée. Il peut aussi être directement appliqué au débit brut radar. Par cette méthode, en prenant comme référence la mesure par exploration des vitesses de la section complète le coefficient moyen pour les deux jaugeages est de 0.76 pour le jaugeage B et 0.83 pour le jaugeage C. Nous retiendrons une valeur moyenne de 0.80 par cette méthode.

Ces deux approches montrent la variabilité du coefficient de vitesse sur un même site. Cette dispersion est en partie du au fait que les mesures sont réalisées dans une section avec une pile de pont dont l'influence sur les profils de vitesse est significative.

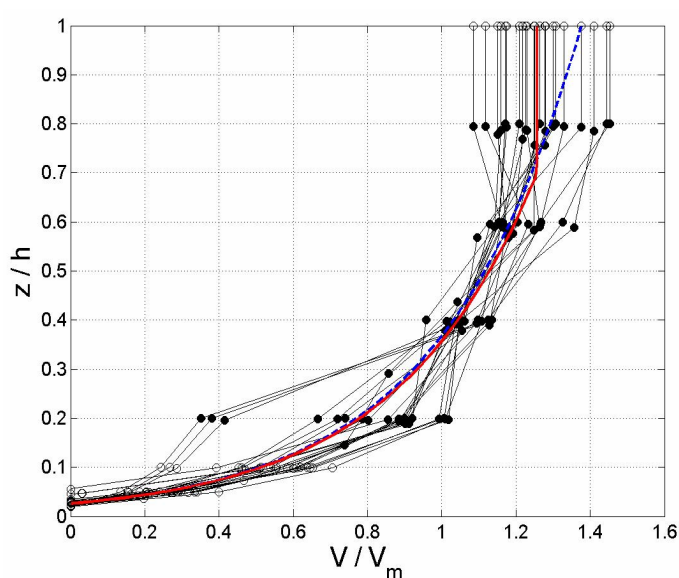


Fig 4a : Etude des profils de vitesse adimensionnels

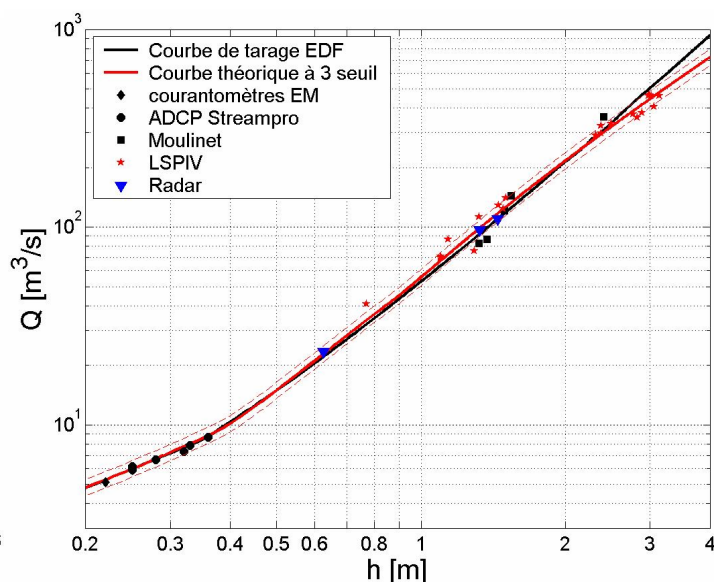


Fig 4b : Courbe de tarage de Pontamafrey

### III RESULTATS ET DISCUSSION

#### III.1.1 Comparaison de débit

Le tableau 1 présente les résultats de calcul du débit en utilisant les deux coefficients déterminés précédemment. Les écarts à la valeur de la courbe de tarage et à la mesure au moulinet dans la section complète sont calculés. Tous ces débits sont calculés avec le logiciel Barème de la DREAL Rhône Alpes. Le débit issu de la courbe de tarage de Pontamafrey est un débit moyen horaire qui lisse donc les fluctuations rapides. Les parties grisées correspondent pour les deux jaugeages aux mesures au moulinet. Les écarts les plus importants sont observés pour le jaugeage avec la vitesse de surface moulinet seule, ce qui est cohérent avec l'analyse du champ des vitesses. Les débits mesurés par LSPIV présentent également des écarts jusqu'à +16% mais les séquences 6, 25 et 26 sont enregistrées en fin de jaugeage et ont une durée de quelques secondes. Le fait de confronter ces mesures en régime hydraulique transitoire à une moyenne horaire dans des périodes de montée des eaux explique en partie ces écarts. Enfin pour les débits issus des mesures au radar de surface l'écart maximal est de 11.3% avec le coefficient de vitesse le moins favorable. Si l'on compare le débit radar au débit moulinet complet les écarts sont tous inférieurs à 10% quel que soit le coefficient utilisé ce qui est très acceptable pour des jaugeages en crue.

Méthode de mesure des vitesses	$\alpha = 0.80$ (m <sup>3</sup> /s)	Ecart à la courbe (%)	Ecart au moulinet (%)	$\alpha = 0.76$ (m <sup>3</sup> /s)	Ecart à la courbe (%)	Ecart au moulinet (%)
<b>Jaugeage B</b>						
Courbe de tarage	<b>92</b>			<b>92</b>		
Exploration complète moulinet	<b>100</b>	8.70		<b>100</b>	8.70	
Surface moulinet	<b>114</b>	25.2	15.2	<b>109</b>	19.0	9.44
Surface moulinet recalculée	<b>106</b>	16.5	7.20	<b>102</b>	10.7	1.84
Surface radar	<b>101</b>	11.30	2.40	<b>97</b>	5.74	-2.72
Surface LSPIV 5	<b>100</b>	9.57	0.80	<b>96</b>	4.09	-4.24
Surface LSPIV 6	<b>100</b>	10.43	1.60	<b>97</b>	4.91	-3.48
<b>Jaugeage C</b>						
Courbe de tarage	<b>110</b>			<b>110</b>		
Exploration complète moulinet	<b>108</b>	-1.82		<b>108</b>	-1.82	
Surface moulinet	<b>126</b>	15.6	17.8	<b>121</b>	9.85	11.9
Surface moulinet recalculée	<b>111</b>	2.55	4.44	<b>107</b>	-2.58	-0.78
Surface radar	<b>115</b>	6.18	8.15	<b>111</b>	0.87	2.74
Surface LSPIV 25	<b>122</b>	12.7	14.8	<b>118</b>	7.09	9.07
Surface LSPIV 26	<b>124</b>	14.2	16.3	<b>119</b>	8.47	10.5

Tab. 1 : Comparaison des débits des deux jaugeages et étude de sensibilité du coefficient de vitesse

### III.1.2 Compléments sur la courbe de tarage de Pontamafrey

Les essais LSPIV de la chasse de 2009 et de la crue de 2008 sur le même site mais en aval du pont donnent des résultats comparables pour une gamme de débits de 40 à 460 m<sup>3</sup>/s [11]. Les courbes de tarage sont souvent extrapolées pour les plus forts débits, ce qui rend les estimations délicates. Les mesures LSPIV effectuées sur l'Arc ont permis d'estimer le débit de la pointe de la crue de 2008, alors que les mesures au saumon étaient quasi-impossibles au pont de St Avre.

La figure 4b représente la courbe de tarage de Pontamafrey sur laquelle sont positionnés tous les points de jaugeage. Les mesures LSPIV ont permis de confirmer une nouvelle courbe de tarage pour le site de Pontamafrey [11]. Il s'agit d'une simple loi d'ouvrage composée à trois seuils qui prend en compte la géométrie de l'ouvrage. Elle ne diffère de la courbe précédente que dans sa partie haute, mais est confortée par les mesures LSPIV. Les points de mesure radar sont également positionnés sur la courbe à moins de 10%. Le coefficient choisi est le plus favorable (0.76). Un point radar pour 22,5 m<sup>3</sup>/s, correspondant à un jaugeage test effectué avant la chasse 2010, le 3 juin, ne s'écarte de la courbe que de 2% seulement.

## IV CONCLUSIONS

On peut donc obtenir une mesure de débit fiable (incertitudes de l'ordre de 10% typiquement) sur un cours d'eau torrentiel en utilisant une méthode de mesure des vitesses de surface sans contact. Plusieurs difficultés sont à prendre en compte dans l'utilisation de ces techniques. Le calcul du coefficient de surface doit faire l'objet d'une expertise particulière du site et de mesures complémentaires au moulinet par exemple ou à l'ADCP. La LSPIV est une technique qui nécessite des mesures de topographie fine et des post-traitements complexes mais elle fournit un champ de vitesse de surface complet mesuré sur quelques secondes (mesure instantanée). La méthode par radar mobile est bien adaptée au jaugeage et plus facile à mettre en œuvre (pas de moteur ni véhicule, pas d'obstruction routière). Dans les deux cas, une bonne connaissance de la bathymétrie et de la hauteur d'eau est indispensable. Ces techniques permettent de mieux documenter les courbes de tarage en particulier en crue. Ce qui permet de réduire l'incertitude considérable qui affecte souvent les hydrogrammes de crue sur les torrents et rivières torrentielles. Ainsi, une meilleure évaluation des quantiles de crue et d'étiage, ainsi que des flux liquides, solides et de contaminants est possible. Ces techniques sont à prendre en compte comme des alternatives intéressantes aux méthodes de mesure de débit traditionnelles qui sont impossibles à mettre en œuvre en conditions extrêmes. De nouveaux tests sont en cours au Cemagref et à la Dreal Rhône Alpes pour améliorer et valider sur d'autres cours d'eau le protocole de jaugeage par vélocimétrie radar.



## V REMERCIEMENTS

Merci à F. Thollet, M. Lagouy (Cemagref) et P. Cluzel (Dreal Rhône Alpes) pour leur implication dans les campagnes de mesure sur l'Arc, à A. Menant et A.L. Besnier (EDF-DTG), aux porteurs de radar A. Bouarab et L. Dramais, et à J.P. Laskowski pour les supports express.

## VI REFERENCES ET CITATIONS

- [1] Hydratec et Cemagref (1999). – Etude hydraulique de l'Arc de Maurienne (de Modane à l'Isère), Morphologie du lit de l'Arc. Rapport technique, Hydratec et Cemagref.
- [2] Fujita, I., Muste, M., Kruger, A. (1998). – Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, **36 (3)**, 397–414.
- [3] Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W. F., Bradley, A., Muste, M., Creutin, J.-D., (2008). – Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method. *Journal of Hydrological Engineering* **13 (2)**, 105-110.
- [4] Kim, Y., Muste, M., Hauet, A., Krajewski, W. F., Kruger, A., Bradley, A. (2008). – Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: A proof of concept. *Water Resources Research*, **44**.
- [5] Le Coz, J., Hauet, A., Dramais, G., Pierrefeu, G. (2010). – Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*. **394 (1-2)** : 42-52.
- [6] Muste, M., Fujita, I., Hauet, A. (2009). – Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, **44**.
- [7] Costa, J., Cheng, R., Haeni, F., Melcher, N., Spicer, K., Hayes, E., Plant, W., Hayes, K., Teague, C., Barrick, D. (2006). – Use of radars to monitor stream discharge by non-contact methods. *Water Resources Research*, **42 (7)**, 14 p
- [8] Siedschlag, S. (2008). – General notes on discharge measurement with KALESTO v, Note technique, Ott Hydrometry.
- [9] NF EN ISO 748 (2009). – Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthodes d'exploration du champ des vitesses, Norme ISO, 50 p.
- [10] Rantz, S. E. (1982). – Measurement and computation of streamflow. Vol. 1, Measurement of stage and discharge, *Water-Supply Paper*, **2175**. U. S. Geological Survey.
- [11] Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., Hauet, A. (2011 - Accepté) – Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves, *Journal of Hydro-Environment Research*.
- [12] Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J., Dramais, G. (2008). – Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, **19 (2)**, 117–127.
- [13] Le Coz J., Pierrefeu G., Paquier A. (2008) Evaluation of river discharges monitored by a fixed side-looking Doppler profiler *Water Resources Research* **44**.
- [14] Hauet, A., Le Coz, J., Dramais, G., Carré, C., Legras, D., Pierrefeu, G., Godayer, C. (2009) Méthodes innovantes pour la mesure des débits fluviaux en continu : profileur Doppler fixe horizontal (H-aDcp) et analyse d'images (LSPIV), *La Houille Blanche*, **3**, p. 123-131.