



HAL
open science

Quantification des incertitudes d'un jaugeage par profileur acoustique à effet Doppler

Guillaume Dramais

► **To cite this version:**

Guillaume Dramais. Quantification des incertitudes d'un jaugeage par profileur acoustique à effet Doppler. Autre. 2011. dumas-00594335

HAL Id: dumas-00594335

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00594335>

Submitted on 19 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.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
CENTRE REGIONAL ASSOCIE DE RHONE ALPES
CENTRE D'ENSEIGNEMENT DE SAINT-ETIENNE

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le **DIPLOME d'INGENIEUR CNAM**

SPECIALITE : Mesure Analyse

OPTION : Instrumentation Qualité

Par

DRAMAIS Guillaume

Quantification des incertitudes d'un jaugeage
par profileur acoustique à effet Doppler

Soutenu le 15 avril 2011

JURY

PRESIDENT :	M. Marc HIMBERT	<i>Professeur titulaire de la chaire d'instrumentation et mesure (Cnam Paris)</i>
MEMBRES :	Mme. Joëlle SURREL	<i>Professeur responsable de la filière (Cnam Saint- Etienne)</i>
	M. Jacques MOLEGNANA	<i>Responsable pédagogique (Cnam Saint-Etienne)</i>
	M. René BEAUVILAIN	<i>Professeur (Cnam Saint-Etienne)</i>
	M. Yves JOURLIN	<i>Professeur (Cnam Saint-Etienne)</i>
	M. Jérôme LE COZ	<i>Ingénieur Chercheur (Cemagref)</i>
	M. Gilles PIERREFEU	<i>Responsable de l'activité hydrométrie (CNR)</i>
	Mme. Karine POBANZ	<i>Ingénieur consultant (ALTRAN pour la CNR)</i>

Remerciements

Merci aux enseignants et personnels administratifs des CNAM de Saint Etienne, Lyon, Grenoble, Strasbourg, Paris, qui m'ont permis d'arriver au bout de ce cycle.

Je rends hommage à M. Coudurier qui m'a convaincu d'intégrer le CNAM.

Merci à M. Himbert d'avoir accepté de présider mon jury, à Mme Surrel de m'avoir suivi pendant mon parcours et d'avoir accepté mon sujet de mémoire. Merci à M. Beauvilain d'avoir accepté de faire partie de mon jury. Merci à M. Jourlain d'être là pour m'aider à clore ce parcours comme il m'avait aidé à le démarrer en 2005 avec le traitement du signal.

Je remercie au Cemagref, Jean-Michel Grésillon et Michel Lang pour leurs encouragements. M. Larcheron, Mme Hamon, M. De Larambergue, M. Confesson pour m'avoir soutenu pendant ces années et pour avoir permis le financement de ma formation. Merci à mes collègues du Cemagref.

Merci à M. Scotti, à Gilles Pierrefeu et Thierry Pantel de m'avoir permis de passer un peu de temps dans leurs équipes. Merci à Karine Pobanz, aux habitants de la villa, à l'équipe de la Jauge, pour leurs conseils et leur accueil amical lors de mes passages éclairs à la CNR. Merci à Bertrand Blanquart pour ses conseils.

Merci à Jérôme Le Coz pour sa confiance, sa patience et son enthousiasme.

Merci à ma famille de m'avoir encouragé tout au long de ce parcours.

Merci à Caroline d'avoir toujours été là.

Merci à Paule Stoupan.

Liste des abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation

AIAA : American Institute of Aeronautics & Astronautics

ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler

ADV : Acoustic Doppler Velocimeter

ASME : American Society of Mechanical Engineers

ASCII : American Standard Code for Information Interchange

CETIAT : Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques

DGPS : Differential Global Positioning System

GUM : Guide to the expression of Uncertainty in Measurement

ISO : International Organization for Standardization

OFEV : Office Fédéral de l'Environnement

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

SI : Système International d'unités

TRDI : Teledyne RD Instruments

USGS : United State Geological Survey

Glossaire des termes techniques

Remarque : Certains termes anglais ne sont pas traduits car d'usage courant chez les hydromètres et souvent plus courts que les expressions françaises les définissant.

Bathymétrie : Mesure de la topographie du fond du cours d'eau.

Bin : Fenêtre ou cellule où est mesurée la vitesse de l'eau par l'ADCP.

Bottom track : Suivi de fond de l'ADCP (mesure de la vitesse de déplacement).

Bottom ping : Séquence d'ondes ultrasonores destinées à mesurer la vitesse de l'ADCP par rapport au fond.

Broadband : Protocole de tir d'impulsions acoustiques cohérentes codées en phase.

Blanking zone : Zone aveugle en surface, à proximité du capteur, qui n'est pas explorée par l'ADCP lors des jaugeages.

Ensemble : Ensemble de données mesurées par l'ADCP sur une verticale.

Etiage : Période de l'année où le débit d'un cours d'eau atteint son point le plus bas.

Jaugeage : Ensemble des opérations destinées à mesurer le débit d'une rivière en un point donné pour un instant donné (plus ou moins long) et pour une hauteur d'eau donnée.

Ping : Emission d'une séquence d'ondes ultrasonores par l'ADCP.

Section : Coupe transversale du cours d'eau généralement perpendiculaire à l'axe principal d'écoulement du cours d'eau.

Transect : Traversée généralement perpendiculaire à l'axe principal d'écoulement du cours d'eau.

Verticale : Echantillon vertical de mesures de vitesses et profondeur.

Water track : Suivi des vitesses d'écoulement de l'ADCP.

Water ping : Séquence d'ondes ultrasonores destinées à mesurer les vitesses de l'eau.

Winriver II : Logiciel d'acquisition et de post-traitement des ADCP TRDI.

Sommaire du mémoire

Liste des abréviations.....	4
Glossaire des termes techniques.....	5
1 Introduction	8
2 Problème posé et travaux antérieurs.....	10
2.1 Les normes	10
2.1.1 Les normes sur la mesure de débit	10
2.1.2 Les normes générales sur l'évaluation des incertitudes	10
2.2 Incertitudes	11
2.2.1 Erreurs et incertitudes.....	11
2.2.2 Calcul des incertitudes	13
2.3 Contexte scientifique	14
2.3.1 Etat de l'art	14
2.3.2 Etalonnage des mesures de vitesse.....	15
2.3.3 Bonnes pratiques	17
2.4 Conclusion de la partie	18
3. Matériel et méthodes.....	18
3.1 L'ADCP : principe et déploiement	18
3.1.1 Le capteur	18
3.1.2 Méthode de calcul du débit	22
3.1.3 Calcul du débit à travers les cellules	22
3.1.4 Parties non mesurées de la section	24
3.2 La norme ISO 748 et l'ADCP.....	26
3.2.1 Modélisation de la mesure de débit par la norme ISO 748	26
3.2.2 Limites de la norme ISO 748 dans le cas de l'ADCP mobile	27
3.3 Modélisation de la mesure de débit dans le cas de l'ADCP mobile	28
3.4 Expression de l'incertitude dans le cas de l'ADCP mobile.....	30
3.5 Conclusion de la partie	31
4 Paramétrage de la méthode.....	31
4.1 Evaluation des incertitudes pour les jaugeages par ADCP mobile	31
4.2 Evaluation des composantes d'incertitude et critères de post-traitements.....	33
4.2.1 u'_s : Composante due aux corrections d'étalonnage des instruments	33
4.2.2 u'_m : Composante sur le nombre de verticales	34
4.2.3 u'_{proj} : Composante aléatoire de l'incertitude sur la projection des vitesses dans le repère de l'ADCP	36
4.2.4 $u'(V_b)$: Composante aléatoire de l'incertitude sur la mesure de vitesse de l'ADCP par rapport au fond	37
4.2.5 $u'(V)$: Composante aléatoire de l'incertitude sur la mesure de vitesse de l'eau	38
4.2.6 $u'(h)$: Composante aléatoire de l'incertitude sur la mesure de hauteur d'eau	40
4.2.7 u'_{exp} : Composante systématique sur les débits extrapolés.....	42
4.2.8 Terme sur les grandeurs d'entrée corrélées	43
5 Résultats et discussions	43
5.1 Application de la méthode sur des exemples de jaugeage	43

5.1.1	Récapitulatif des résultats.....	43
5.1.2	L'exemple de Roquemaure : RQ1 & RQ2.....	45
5.1.3	L'exemple de Pierrelatte : PIE.....	47
5.1.4	L'exemple de Romans sur Isère : ROM.....	49
5.1.5	L'exemple de Caderousse : CAD.....	51
5.1.6	L'exemple de Nant : NAN.....	52
5.1.7	L'exemple de Charbonnières les bains : CHA.....	55
5.2	Conclusion sur les résultats.....	59
5.3	Perspectives sur l'évaluation des différents termes.....	59
5.3.1	u'_m : Composante sur le nombre de verticales.....	59
5.3.2	u'_{proj} : Composante sur les projections.....	61
5.3.3	Tangage, roulis et enfoncement du capteur.....	61
5.3.4	$u'(V_b)$: Composante sur la vitesse de l'ADCP.....	62
5.4.5	La vitesse de l'eau dans la zone aveugle.....	62
5.4.6	La température.....	62
5.4.7	La durée de mesure.....	63
5.4.8	Les parties invalidées.....	63
6	Conclusion.....	63
	Table des annexes.....	65
	Bibliographie.....	86
	Liste des figures.....	89
	Liste des tableaux.....	91

1 Introduction

Des mesures fiables permettent de prendre des décisions adaptées, notamment pour préserver la santé et la sécurité des usagers.

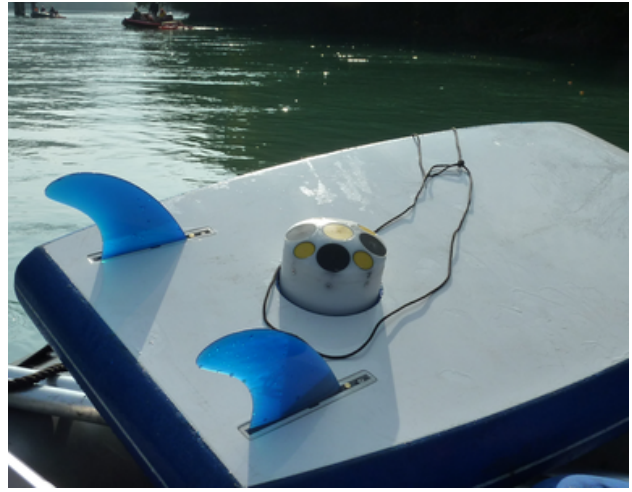
Le débit des cours d'eau est une mesure qui doit être fiable. L'exactitude de ces valeurs a une incidence sur la sécurité des personnes (inondations), sur la survie des espèces vivantes dans ces milieux, notamment en période d'étiage, sur l'exploitation de la ressource en eau (eau potable, irrigation, industrie, production d'électricité, refroidissement des centrales nucléaires...), sur l'utilisation des rivières et fleuves (navigation).

L'hydrométrie est la discipline de la métrologie qui concerne les mesures d'écoulement de l'eau dont le débit. Il existe plusieurs méthodes de mesure du débit. La méthode qui nous intéresse dans cette étude est la méthode d'exploration du champ des vitesses définie par la norme EN ISO 748 (Afnor, 2009). Elle consiste à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section ainsi que la géométrie de la section mouillée.

Plusieurs types de capteurs et débitmètres existent pour explorer le champ des vitesses. Dans ce travail, nous étudierons plus particulièrement les profileurs de courant à effet Doppler (ADCP pour Acoustic Doppler Current Profiler) (fig. 1b). Instruments acoustiques, ils ont été développés au départ pour des applications océanographiques, et dans les années 1990, les ADCP étendent leur champ d'application aux rivières. Ils sont maintenant considérés comme incontournables pour établir la vitesse du courant car ils remplacent les appareils mécaniques (moulinets hydrométriques) dans de nombreux cas. Efficaces, performants et sûrs, ils effectuent les relevés plus rapidement, couvrent une zone plus large et offrent une résolution spatiale et temporelle plus fine. Le principe est d'immerger en surface et de faire traverser l'ADCP perpendiculairement au cours d'eau : on parle dans ce cas-là du déploiement par « bateau mobile » (fig. 1a). Une méthode par verticales successives permet aussi de mesurer le débit : on déplace alors le capteur sur plusieurs verticales qui sont mesurées en maintenant le capteur immobile pendant le temps d'acquisition. Le résultat obtenu est un profil de vitesses dans la section échantillonnée ainsi que sa bathymétrie.



Fig 1.a : Déploiement mobile de deux ADCP



b. Vue de dessous d'un capteur ADCP et de son support

Ces instruments très récents interpellent les métrologues pour plusieurs raisons :

- Ils ont une très bonne répétabilité et donnent de bons résultats rapidement.
- Ils sont fournis sans certificat d'étalonnage.
- Personne n'est qualifié dans la communauté des laboratoires d'étalonnage pour contrôler et certifier ces instruments, les mesures ne sont donc pas raccordées au SI.
- Les données et les traitements sont complexes.

Les utilisateurs effectuent eux-mêmes des contrôles périodiques en comparant les instruments entre eux ou en comparant les résultats de mesure à des résultats issus de méthodes différentes. Plusieurs études sur l'évaluation des incertitudes des jaugeages ADCP sont en cours ou ont été publiées.

Ce travail s'inscrit dans une démarche de meilleure connaissance des incertitudes liées aux mesures ADCP. Nous verrons dans une première partie, après avoir défini les incertitudes, les différentes approches en cours dans la communauté scientifique ; nous proposerons ensuite une méthode et des critères de traitement de données permettant d'évaluer les incertitudes liées à un jaugeage par ADCP mobile. Enfin nous testerons cette méthode sur un jeu de données représentatif et nous discuterons des améliorations et perspectives de cette méthode.

2 Problème posé et travaux antérieurs

2.1 Les normes

2.1.1 Les normes sur la mesure de débit

La norme ISO 748 (ISO, 2009) est une norme spécifique aux mesures de débit par jaugeage au courantomètre, qui décrit la technique d'exploration du champ des vitesses et le calcul d'incertitude associé. Le calcul d'incertitude de cette norme est critiqué par certains utilisateurs car elle ne prend pas en compte les extrapolations de vitesse non mesurée aux marges de la section (bord, haut, fond) et donne un poids très important à l'incertitude liée au nombre de verticales échantillonnées. De plus, les valeurs données à titre d'exemple dans l'annexe E sont difficiles à généraliser. Elle reste cependant la principale référence.

La norme ISO 5168 (ISO, 2005) présente des généralités sur le calcul des incertitudes appliqué aux mesures de débit. Les concepts sont très proches du guide NF ENV 13005 (ISO, 1999). L'exemple de la norme ISO 748 est repris en annexe avec une variante sur le temps d'exposition.

La norme ISO 3455 (ISO, 2007) encadre l'étalonnage de courantomètres en bassins découverts rectilignes. Une passerelle sur laquelle sont fixés les capteurs se déplace à vitesse connue au dessus d'un bassin. Plusieurs vitesses sont testées et permettent l'étalonnage. Ce processus n'est pas encore applicable aux ADCP pour des problèmes de qualité d'écho dans les bassins (Lebarbu, 2008 ; Dramais, 2009).

La norme ISO 1088 (ISO, 1986) concerne la détermination des composantes de l'erreur limite totale dans le mesurage du débit, notamment les composantes individuelles de l'erreur sur la largeur, la profondeur et la vitesse.

2.1.2 Les normes générales sur l'évaluation des incertitudes

Le guide NF ENV 13005 (ISO, 1999) ou GUM, guide général sur l'expression des incertitudes de mesure, est applicable à tous les processus de mesure. La méthode repose sur l'analyse du processus de mesure, l'identification des grandeurs d'entrée et l'écriture d'un modèle

mathématique reliant les grandeurs d'entrée aux grandeurs de sortie afin de propager et combiner les différentes composantes d'incertitudes sur les grandeurs d'entrée.

2.2 Incertitudes

2.2.1 Erreurs et incertitudes

L'incertitude est un paramètre associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande (GUM). L'erreur est la différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie de la grandeur ou mesurande que l'on cherche à déterminer. Comme la valeur vraie n'est jamais connue, l'erreur n'est jamais connue. Lorsque l'on cherche à déterminer la valeur d'une grandeur physique quelle qu'elle soit (le débit d'un cours d'eau par exemple), des erreurs se produisent inévitablement. Elles se situent au niveau des différentes opérations de mesure, et elles se propagent jusqu'à l'obtention du résultat final. Toute opération de mesure est donc entachée d'erreurs dont les sources sont multiples :

- La méthode de mesure : son principe théorique est fondé sur un jeu d'hypothèses simplificatrices qui ne sont pas forcément respectées (par exemple : débit permanent, variation linéaire des vitesses entre verticales de mesure, ouvrage hydraulique idéal, etc.)
- L'instrumentation : erreurs élémentaires liées à chaque instrument de mesure utilisé dans la chaîne de mesure.
- L'opérateur et la mise en œuvre : soin apporté à l'exécution du protocole de mesure, lecture et consignation des mesures intermédiaires, répétition des mesures, expérience, dextérité, régularité, etc.
- L'environnement de mesure : les conditions expérimentales (configuration du site, conditions d'écoulement, etc.) peuvent amplifier les erreurs liées à la méthode, à l'instrumentation et à l'opérateur.

2.2.1.1 Erreurs systématiques et erreurs aléatoires

On peut distinguer deux types d'erreur : les erreurs systématiques (petits écarts obtenus en fonctionnement nominal des équipements que des observations répétées ne permettent pas

d'identifier ni de quantifier) et les erreurs aléatoires (manque de sensibilité de l'appareil de mesure, résolution de la lecture, fluctuations naturelles de la grandeur à mesurer, etc.).

Les erreurs systématiques ne sont pas affectées par la répétition des mesures et ne peuvent être réduites qu'en utilisant des en appliquant des corrections, lesquelles sont déterminées par des mesures complémentaires telles que des étalonnages. L'application concurrente de différents appareils ou de différentes méthodes à la mesure d'un même débit peut permettre d'identifier certaines erreurs systématiques liées à un appareil ou à une méthode en particulier.

Les erreurs aléatoires sont réduites lorsque l'on répète les mesures, l'incertitude de la moyenne de n mesures indépendantes répétées étant \sqrt{n} fois plus faible que l'incertitude de chacune des n mesures initiales (par exemple, si l'incertitude relative sur une mesure est de 10% et si la mesure est répétée 4 fois, l'incertitude de la moyenne de ces quatre mesures sera deux fois moindre, soit 5%). Cependant, ceci signifie également que plus on répète la mesure, plus le gain sur l'incertitude devient faible. Pour les méthodes suffisamment rapides pour permettre la répétition des mesures, on considère généralement que la réalisation de trois à six mesures successives donnant des résultats du même ordre de grandeur constitue un bon compromis.

2.2.1.2 Notion d'incertitude de mesure

Comme la valeur vraie et donc l'erreur ne sont jamais connues en pratique, la distribution statistique de l'erreur doit être estimée par une analyse d'incertitude (Fig. 2). En pratique, une mesure est la donnée d'une valeur moyenne et d'un intervalle d'incertitude dans lequel on estime que la vraie valeur a une probabilité donnée de se trouver. En général, l'intervalle d'incertitude correspond à un niveau de confiance de 95%. Ceci signifie qu'on estime que, statistiquement dans 95 cas sur 100, l'écart entre le résultat issu de la mesure et la vraie valeur doit être inférieur ou égal à l'incertitude annoncée.

La méthode du GUM suppose que les erreurs systématiques ont été corrigées au mieux, l'incertitude résiduelle devant alors être traitée comme une incertitude liée à des effets aléatoires. Le traitement des incertitudes issues d'effets systématiques ou aléatoires par la méthode du GUM est donc identique.

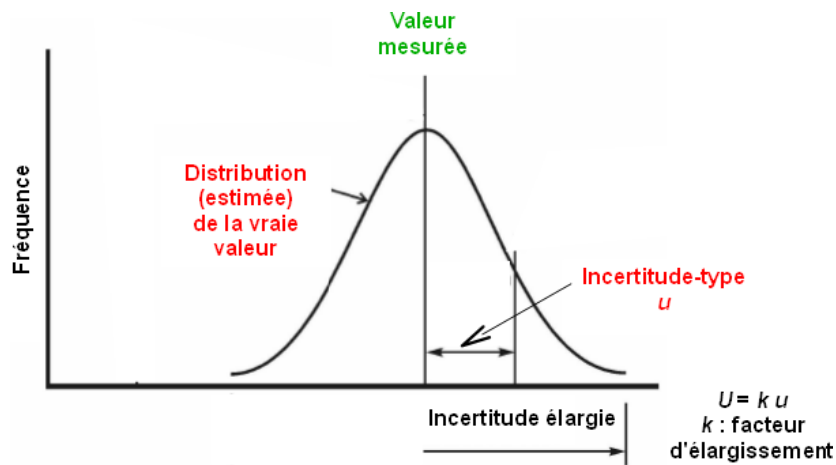


Fig. 2 : Notion d'incertitude de mesure : distribution estimée de la vraie valeur (inconnue) autour de la valeur mesurée.

2.2.2 Calcul des incertitudes

2.2.2.1 L'incertitude-type

L'incertitude-type, notée u , est une mesure de la largeur de la distribution (ou encore de la dispersion) de la valeur vraie autour de la valeur mesurée (Fig. 2). Elle est mathématiquement équivalente à un écart-type de cette distribution. Pour calculer l'incertitude élargie, notée U , à afficher avec le résultat de mesure, on multiplie l'incertitude-type par un facteur d'élargissement k correspondant à un certain niveau de confiance (Fig. 2) :

- $k = 1$: niveau de confiance à 68%
- $k = 2$: niveau de confiance à 95%
- $k = 3$: niveau de confiance à 98%

Pour une loi de distribution gaussienne : cela revient à considérer que l'on applique le théorème de la Limite Centrale, qui indique que la combinaison linéaire de lois de distributions "quelconques" tend vers une loi gaussienne.

2.2.2.2 Evaluation des incertitudes-types élémentaires

La formule mathématique qui sous-tend chaque méthode de détermination du débit jaugé permet d'identifier chacune des grandeurs élémentaires mesurées X . Reste alors à estimer l'incertitude-

type u_X associée à la mesure de chaque grandeur X , ou encore l'incertitude-type relative, notée u'_X (en pourcentage de la valeur mesurée, telle que $u'_X = u_X/X$).

On évalue l'incertitude-type associée à chaque erreur résiduelle (après meilleure correction des effets systématiques), sans distinguer les effets systématiques des effets aléatoires. L'incertitude-type peut être estimée à partir d'essais statistiques, comme des essais de laboratoire ou de terrain, en conditions contrôlées : on parle alors d'estimation de type A. L'incertitude-type peut aussi être estimée à partir d'autres sources d'information (type B), comme la documentation technique, l'expertise, etc. L'évaluation de l'incertitude-type implique de supposer un type de distribution, qui sera dans la plupart des cas pratiques soit rectangulaire, soit normale.

2.2.2.3 Calcul de l'incertitude combinée

A partir du modèle mathématique de la mesure, on combine toutes les incertitudes-types pour évaluer l'incertitude-type combinée, selon la formule de propagation des incertitudes. La combinaison des incertitudes permet de quantifier le poids relatif de chaque incertitude élémentaire dans l'incertitude composée $u_c(y)$. Soit l'expression de la variance composée $u_c^2(y)$ donnée par :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (1)$$

Où f est la fonction qui modélise le mesurage et où chaque $u(x_i)$ est une incertitude type.

2.3 Contexte scientifique

2.3.1 Etat de l'art

Depuis leur mise sur le marché les ADCP ont été testés, comparés à d'autres méthodes, puis validés par les utilisateurs à qui ce nouvel outil faisait gagner du temps de mesure et de dépouillement mais dont le fonctionnement interne semblait obscur. Des groupes d'utilisateurs, comme en France le Groupe Doppler (Le Coz et al., 2007), des chercheurs mais aussi l'ISO et l'OMM s'intéressent de près à cet outil et à l'évaluation des incertitudes sur le débit qu'il fournit.

Dès 2001, Simpson (2001) propose un modèle simplifié pour l'évaluation des incertitudes sur la mesure de débit par ADCP et des pistes de travail sur les principales sources d'incertitudes.

Herschey (2002) propose l'utilisation du GUM, d'une notation simplifiée, et donne des exemples pour l'évaluation des incertitudes pour les mesures de débit à l'aide des courantomètres sur perche. Le constructeur d'ADCP Sontek (2007) propose une application de la norme ISO 748 pour des jaugeages par verticales successives. Le logiciel de gestion de données « Sontek stationary » propose pour chaque jaugeage un double calcul d'incertitude soit par la méthode ISO 748 soit par une méthode statistique issue des travaux de chercheurs de l'USGS.

La méthode de propagation des incertitudes est explorée par des ingénieurs de l'USGS et des chercheurs de l'université d'Iowa. Ils travaillent depuis plusieurs années sur différentes pistes pour obtenir un calcul d'incertitude implémenté dans un logiciel pour les mesures ADCP depuis un bateau mobile. Ces études prenaient comme référence la norme de l'AIAA sur l'évaluation des incertitudes, elles s'appuient maintenant sur le GUM. Muste (2004) s'intéresse aux sources d'erreur lors des jaugeages ADCP, puis avec J. A Gonzales-Castro (2007) identifie pas moins de 20 sources d'erreur. Il propose une analyse et une approche mathématique pour l'évaluation des incertitudes sur le débit. Kim (2010) travaille aussi sur l'incertitude sur la mesure de vitesse par ADCP. Ces travaux n'aboutissent pas encore à un calcul simplifié utilisable pour les jaugeages courants.

En parallèle en France, le CETIAT mandaté par la CNR entreprend d'estimer les incertitudes sur les jaugeages au moulinet, à l'ADCP (Olivier, 2006) et tente des comparaisons de jaugeages avec des méthodes de mesure métrologiquement mieux maîtrisées. En prenant comme référence des jaugeages au moulinet, l'incertitude de mesure élargie ($k=2$; 95 %) est estimée inférieure à ± 5 % ce qui ne satisfait pas les utilisateurs d'ADCP qui sont habitués à des écarts très inférieurs lors des différents tests comparatifs.

2.3.2 Etalonnage des mesures de vitesse

Il est difficile de faire subir aux ADCP les mêmes étalonnages qu'aux moulinets, ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) ou courantomètres électromagnétiques. Les vitesses mesurées par les capteurs sont comparées à la vitesse de déplacement d'un chariot qui maintient les instruments dans un bassin dans lequel l'eau est au repos (Fig. 3). Le manque de matières en suspension dans l'eau des bassins d'étalonnage et leur section trop petite (les parois provoquent des réflexions parasites) rendent difficile l'interprétation des données. Les bassins de carène offrent des

possibilités d'essais dans des configurations plus propices (Lebarbu, 2008). Shih (2000) a réalisé des essais dans l'un des plus grands bassins de carène du monde dans le Maryland aux Etats Unis. Les vitesses explorées vont de 5 cm/s à plus de 2 m/s. Ces tests ont confirmé les spécifications des constructeurs en terme d'écart de justesse. Oberg (2007) a repris ces mesures et des jeux de données de terrain très variées pour publier des résultats d'écarts en vitesse de 0,51 % pour la vitesse de fond et 1,10 % pour la vitesse de l'eau mesurées par ADCP.

L'utilisation de DGPS peut permettre également de contrôler les distances parcourues, la qualité du suivi de fond et les vitesses (Oberg, 2002).

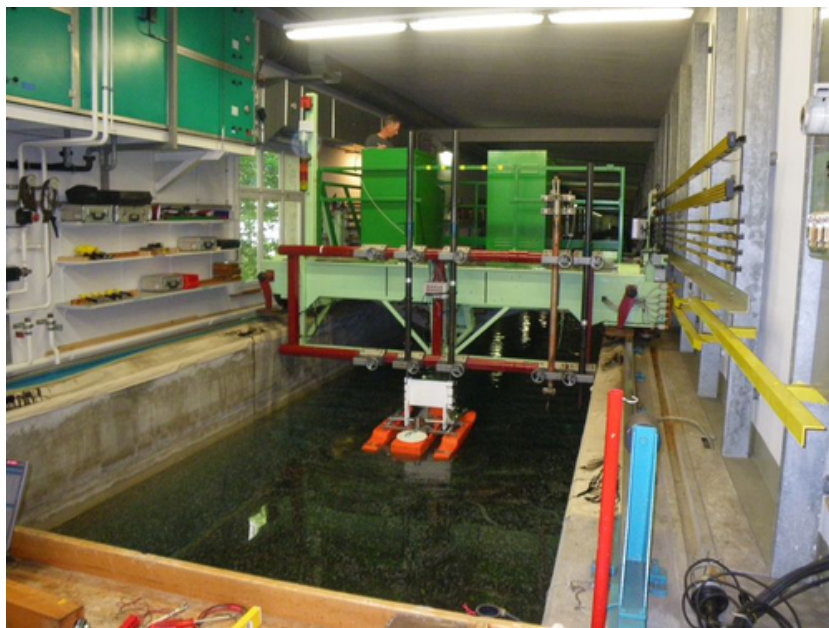


Fig. 3 : Déploiement d'un ADCP dans le canal d'étalonnage de l'OFEV (Berne, Suisse) en 2008.

Le constructeur Teledyne RDI met à disposition un logiciel de simulation de déploiement de capteurs ADCP (PlanADCP.exe) qui calcule une incertitude sur la vitesse de l'eau suivant les paramètres de réglages choisis par l'opérateur sur le terrain. RDI a été contacté à ce sujet mais la méthode de calcul reste confidentielle. Les valeurs issues de ce logiciel seront utilisées dans la suite de cette étude. Son concurrent principal Sontek a implémenté un calcul d'incertitude dans l'un des logiciels (Sontek Stationary) de sa gamme pour les jaugeages par verticales successives. Aucun des constructeurs ne fournit de certificat d'étalonnage car aucun laboratoire d'étalonnage n'est en mesure actuellement de raccorder à un étalon la mesure de vitesse des ADCP.

L'ADCP ne mesure pas les vitesses dans toute la section. Les vitesses en surface, au fond et sur les bords sont donc extrapolées sur la base de calculs théoriques proposés par les logiciels de traitement des mesures ADCP. La méthode d'extrapolation sur les bords s'inspire des travaux de Simpson (2001). Les logiciels proposent 3 méthodes pour l'extrapolation en surface et au fond. Ces méthodes sont décrites dans l'ouvrage de Le Coz et al. (2008). Cet aspect apporte potentiellement une erreur supplémentaire au résultat de débit lui-même. La proportion entre débit mesuré et extrapolé par rapport au débit total doit donc être finement critiquée.

2.3.3 Bonnes pratiques

Au niveau des pratiques de mesure, l'USGS (Oberg, 2005), repris dans la spécification technique de l'ISO TS 24154, préconise de moyenniser 4 mesures successives et de recommencer la série si l'une des mesures s'écarte à plus de 5 % de la moyenne. Il convient alors de moyenniser les 8 mesures. En France, le Groupe Doppler préconise des séries de 6 traversées. Oberg (2007), à partir d'un jeu de données considérable montre qu'augmenter le temps de mesure plutôt que le nombre de traversées permet de réduire significativement les incertitudes.

Des tests comparatifs *in situ* dans le monde entier ont été recensés pour partie dans le guide « Mesures hydrologiques par profileur Doppler », (Le Coz, 2008). Dans les rapports de ces campagnes de mesures, différentes configurations de cours d'eau sont étudiées avec divers instruments. On trouve des écarts entre capteurs ou entre techniques de l'ordre de 1 à 5 % dans les cas sans instabilité hydraulique. Justesse, fidélité, répétabilité de la mesure sont testées lors de ces essais.

Dans l'attente d'une norme pour encadrer les mesures par ADCP, les équipes d'hydrométrie de plusieurs pays se fédèrent afin de réaliser des campagnes de test comparatif (intercomparaison), où les instruments sont confrontés simultanément les uns aux autres dans différentes conditions. Ce type de test se généralise et permet d'améliorer les protocoles de déploiement et le suivi métrologique des instruments.

On a donc plusieurs approches du problème de l'encadrement des résultats de mesure des jaugeages ADCP :

- Une approche de type GUM décrivant mathématiquement le processus de mesure et la propagation des incertitudes.
- Une approche de type comparaison où l'on confronte le résultat de mesure de l'ADCP à une mesure de référence.
- Les bonnes pratiques et le savoir faire des jaugeurs qui par expérience estiment les incertitudes inférieures à 5 % dans les bonnes conditions d'application.

2.4 Conclusion de la partie

Plusieurs équipes de recherche, gestionnaires de cours d'eau, services nationaux et internationaux, cherchent à mieux encadrer les mesures de débit en particulier avec les ADCP mobiles. La difficulté principale reste l'absence à l'heure actuelle de raccordement métrologique au SI. Plusieurs équipes de recherche ont développé des cadres théoriques de calcul qui ne sont pas applicables facilement en l'état. L'objectif de cette étude est donc d'arriver à proposer une méthode simple et opérationnelle pour déterminer les incertitudes sur les jaugeages ADCP mobile.

3. Matériel et méthodes

3.1 L'ADCP : principe et déploiement

3.1.1 Le capteur

Le capteur est immergé à la surface de l'écoulement (Fig. 4.a) et déplacé le long d'un transect. Il permet d'effectuer des mesures de profondeur et de vitesses sur toute la section. Le déploiement le plus courant est dit du « bateau mobile » (déplacement d'un bateau ou d'un support et enregistrement continu). L'ADCP peut aussi être utilisé en mode stationnaire (enregistrements successifs de verticales judicieusement placées dans la section).

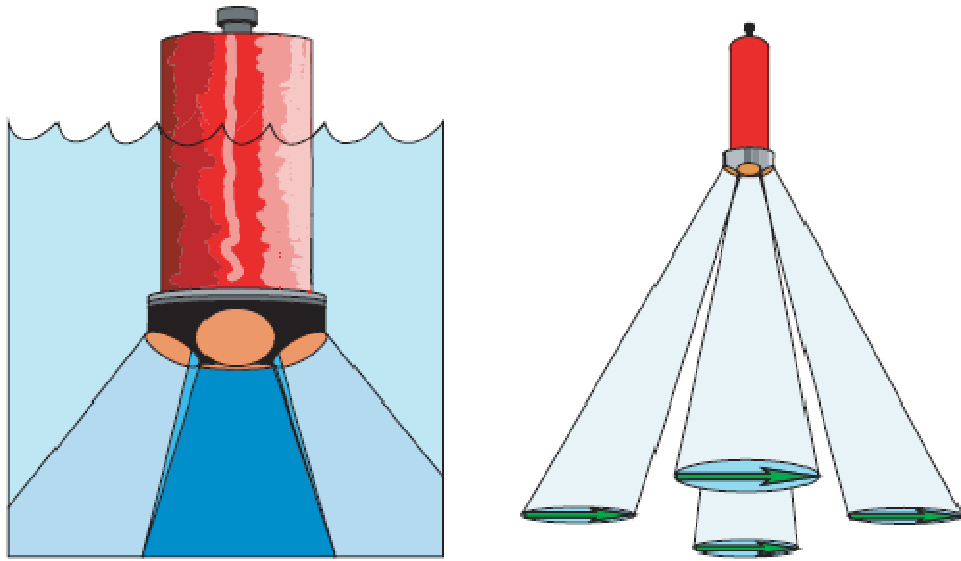


Fig. 4. a : Schéma d'un ADCP immergé sous la surface de l'eau.

b. Représentation des faisceaux en configuration Janus

L'ADCP n'effectue pas une mesure ponctuelle de la vitesse. La mesure de vitesse est reconstituée à partir de mesures de vitesses projetées sur quatre faisceaux distincts (Fig. 4b) et orientés différemment (on parle de configuration Janus des transducteurs). Elle doit être considérée comme une valeur moyenne sur le volume de mesure ainsi défini. Ceci reste valable tant que les trois composantes des vitesses sont bien homogènes sur ce domaine. Certaines données sont invalidées si l'hypothèse d'homogénéité n'est pas vérifiée.

L'appareil émet des ultrasons qui sont renvoyés par les particules en suspension et par le fond. Le temps de retour de ces ultrasons permet de mesurer la distance du fond et des cellules de mesure des vitesses. L'analyse de l'effet Doppler permet de mesurer les vitesses d'écoulement le long de la verticale de mesure. Le décalage fréquentiel Δf entre l'onde émise et l'écho est proportionnel à la fréquence d'émission et à la vitesse des particules donc de l'écoulement (Fig. 5).

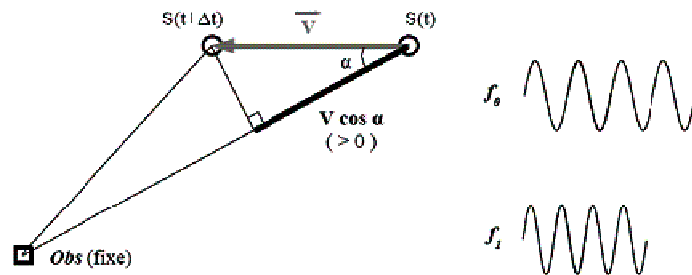


Fig. 5 : L'effet Doppler

$$V \cos \alpha = \frac{C}{2} \frac{\Delta f}{f_0} \quad \text{avec} \quad \Delta f = f_1 - f_0 \quad (2)$$

Avec

C : la célérité du son dans l'eau ;

Δf : le décalage fréquentiel entre l'onde émise f_0 et l'écho ré-émis f_1 par les particules ;

$V \cos \alpha$: la vitesse des particules projetée sur l'axe du faisceau.

La fréquence des ultrasons émis varie selon les modèles de 300 à 3000 kHz. Une mesure de température de l'eau permet de calculer la vitesse de propagation du son dans l'eau. Si l'ADCP est équipé d'inclinomètres, le tangage et le roulis peuvent être mesurés et compensés. S'il est équipé d'un compas, les vitesses et la trajectoire peuvent être orientées par rapport au nord magnétique ; s'il est couplé à un GPS, elles peuvent être orientées par rapport au nord géographique.

Dans le cas d'un jaugeage par ADCP mobile, la vitesse de déplacement de l'appareil est mesurée selon le même principe Doppler (on parle de suivi de fond, ou bottom-tracking et pour le suivi des vitesses de l'eau on parlera du water-tracking). La méthode du suivi de fond suppose que le fond du cours d'eau est immobile. Dans cette étude, nous étudierons ce type de déploiement qui est le plus courant pour mesurer le débit d'un cours d'eau.

L'ADCP est déplacé d'un bord à l'autre de la section à jauger. Le débit est calculé par intégration des vitesses sur une traversée, selon une méthode de calcul similaire au jaugeage par exploration

des vitesses classique, mais sur un très grand nombre de cellules (Fig. 6) de mesure comparativement aux jaugeages point par point réalisés au moulinet ou courantmètre (Fig.7).

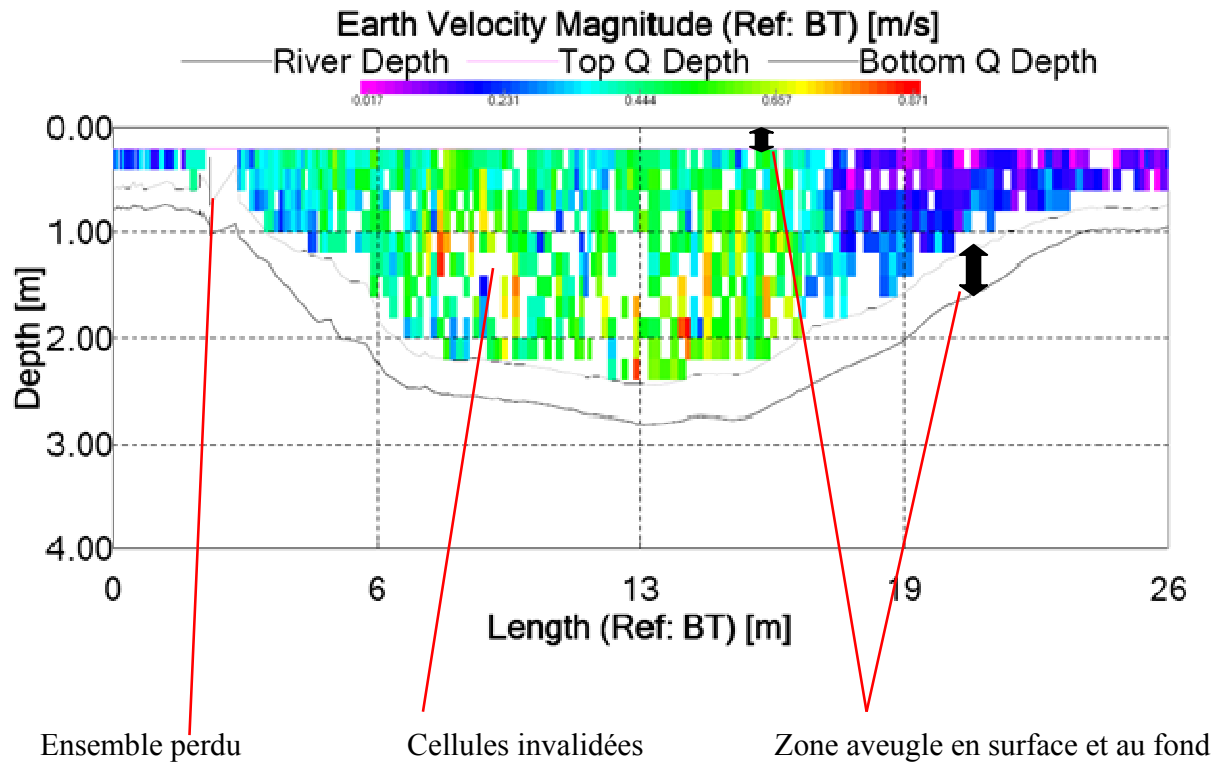


Fig. 6 : Exemple de répartition des points de mesure de vitesse ADCP dans une section du Suran à Varambon. (Winriver II).

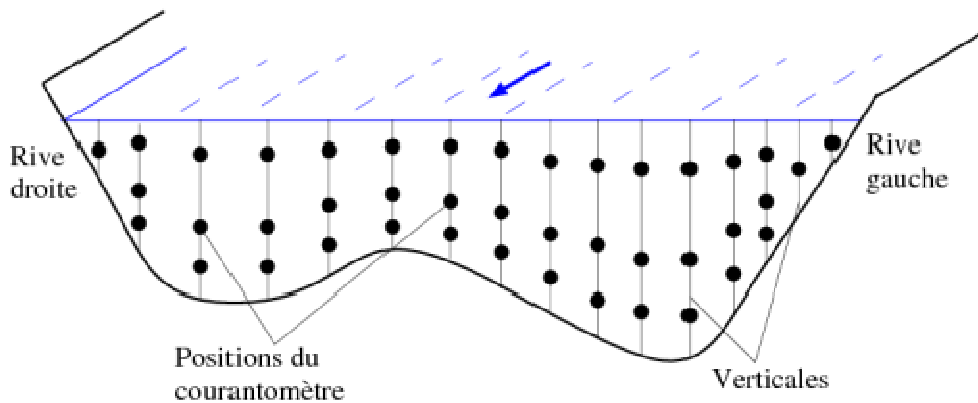


Fig. 7 : Exemple de répartition des points de mesure au courantmètre classique dans la section de jaugeage.

3.1.2 Méthode de calcul du débit

Le suivi de fond permet à l'ADCP mobile de mesurer et de positionner les vitesses de l'écoulement et la bathymétrie. Lors d'une traversée de cours d'eau, l'ADCP discrétise le profil de vitesse. Le découpage consiste en des éléments verticaux nommés ensembles dans le cas des mesures ADCP et verticales dans la norme ISO 748. Chaque ensemble consiste en une succession de cellules de vitesses correspondant chacune à une mesure (Fig. 6).

La distance entre deux ensembles et le nombre de cellules vont dépendre de la vitesse du bateau et d'un certain nombre de réglages comme le pas de temps de mesure du profileur, la taille de cellule choisie, le temps entre les impulsions ultrasonores. Certains ensembles et cellules seront invalidés si certains critères de qualité de mesure ne sont pas respectés (mauvaise corrélation des échos, hétérogénéité des vitesses vues par chaque faisceau).

Le débit total mesuré Q est alors la somme des débits à travers chaque cellule de mesure intégrée sur tous les ensembles.

$$Q = \int_{\text{parcours}} \int_{\text{verticale}} \vec{n}(L) \cdot \vec{V}(L, z) dL dz \quad (3)$$

Avec L la position le long d'un parcours arbitraire qui traverse le cours d'eau d'un bord à l'autre ;

$\vec{n}(L)$: vecteur unitaire horizontal normal au parcours en L ;

$\vec{V}(L, z)$: vecteur vitesse ;

z : profondeur du point de mesure.

3.1.3 Calcul du débit à travers les cellules

Le débit Q_i passant à travers une cellule est déterminé directement à partir des mesures de vitesse de l'eau et du fond (déplacement) :

$$Q_i = \vec{V}_i \cdot \vec{n} DS_i \quad (4)$$

$$= V_i V_b \sin(\alpha_i - \beta) D_z D_t \quad (5)$$

Avec toutes les vitesses prises par rapport au fond supposé immobile (référentiel terrestre) ;

\vec{V}_i : vitesse de l'eau mesurée dans la cellule i ;

\vec{n} : vecteur unitaire normal à la cellule i ;

DS_i : surface élémentaire de la cellule i ;

\vec{V}_b : vitesse du bateau pour l'ensemble considéré ;

D_z : hauteur de la cellule i ;

D_t : temps entre l'ensemble considéré et le dernier ensemble validé;

α_i : direction de l'écoulement dans la cellule i ;

β : direction de la vitesse du bateau.

Les angles α_i et β sont considérés par rapport au faisceau 3, qui correspond au référentiel propre de l'ADCP, le calcul du débit est donc indépendant du compas interne de l'ADCP. La figure 8 illustre l'expression du débit à travers une cellule i .

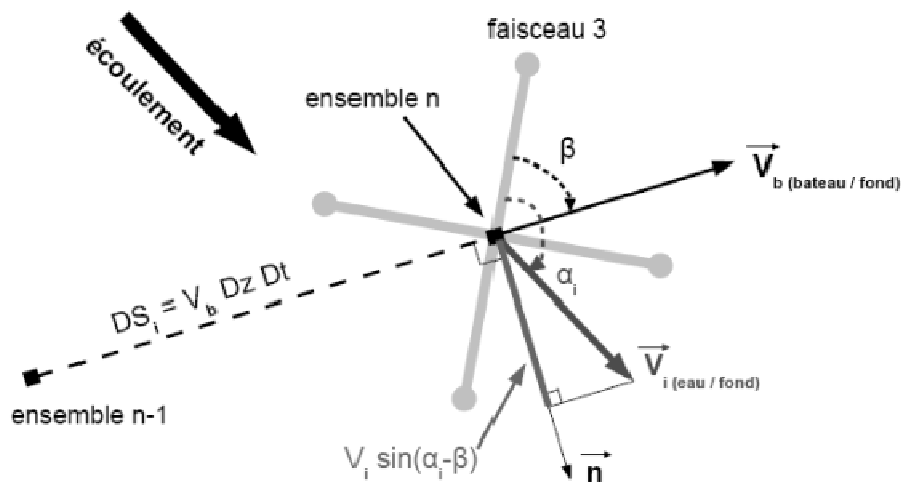


Fig. 8 : Calcul du débit élémentaire à travers une cellule, en mode référence bottom-track (vue de dessus)

3.1.4 Parties non mesurées de la section

L'ADCP ne mesure pas de vitesse dans les zones suivantes (Fig. 6) :

- La partie supérieure de la section (champ proche) à cause de l'immersion des transducteurs et de la résonance des céramiques.
- La partie inférieure de la section (6 % de la profondeur) à cause des réflexions parasites.
- Les bords près des rives, par manque de profondeur
- Les cellules et ensembles invalidés

Ces débits non mesurés sont donc estimés par des méthodes d'extrapolation modifiables en post traitement. Ces méthodes sont calées sur la partie mesurée, Q_{mes} .

S'agissant de l'extrapolation du profil de vitesse on suppose généralement 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 (ISO 748). Le logiciel Winriver II propose trois types d'extrapolations en surface : en loi puissance (Fig. 9), constante, ou linéaire à partir des vitesses des trois premières cellules. Pour l'extrapolation au fond, la méthode puissance est utilisable et une loi sans glissement, qui est en fait une loi puissance calée sur les vitesses mesurées en bas du profil pour $z \leq 0.2h$ (avec h la hauteur d'eau).

La méthode puissance consiste à appliquer à la surface ou au fond la vitesse moyenne calculée à partir d'une loi puissance (l'exposant le plus souvent utilisé est $1/6$). La méthode constante consiste à appliquer à la zone non mesurée en surface la valeur de vitesse mesurée dans la cellule mesurée la plus haute.

L'estimation du débit près des rives s'inspire d'une formule utilisée par l'USGS (Fulford et Sauer, 1986) : le calcul s'appuie sur la distance au bord, une vitesse et une profondeur déterminées en moyennant les ensembles aux extrémités du transect. Un coefficient de forme de berge pondère le débit de la rive : triangulaire (0,35), rectangulaire (0,91) ou laissé au choix de l'opérateur. La distance au bord ou « laisse » est la distance estimée ou mesurée par l'opérateur entre le capteur et la berge, lors du démarrage de l'enregistrement sur un bord de la section et lors de la fin de l'enregistrement sur la rive opposée.

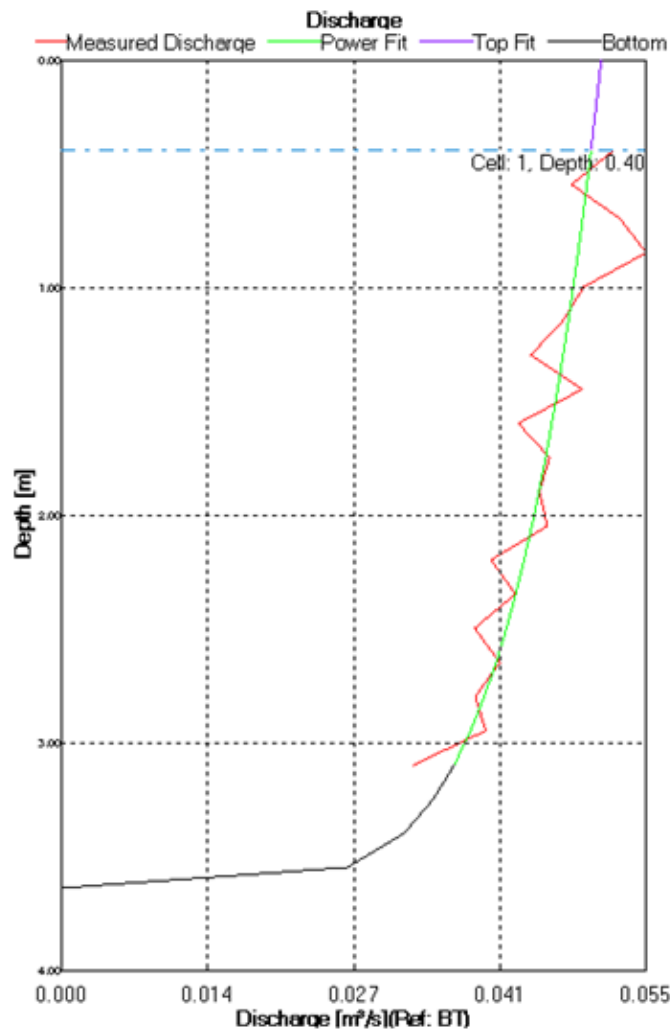


Fig. 9 : Exemple de profil de débit avec extrapolation par loi puissance (Winriver II)

Pour l'estimation du débit des cellules invalidées, la vitesse est extrapolée en fonction de la vitesse de la cellule de même profondeur de l'ensemble suivant. De la même façon lors de la perte d'un ensemble, c'est l'ensemble valide suivant qui est pris en compte pour l'extrapolation du déplacement, de la profondeur et des vitesses.

3.2 La norme ISO 748 et l'ADCP

Remarque sur les notations :

- Les incertitudes types u sont exprimées en m^3/s ou en unités du SI.
- Les incertitudes types u' sont exprimées en % et calculées suivant $u'_x = \frac{u_x}{x}$
- Les incertitudes élargies U et U' sont exprimées en m^3/s ou en % avec un coefficient d'élargissement tel que $U = k \times u$ et $U' = k \times u'$ (en pratique $k=2$ avec un intervalle de confiance de 95 %).
- Les cellules de mesures sont notés en indice k
- Les ensemble ADCP et verticales courantomètres sont notées en indice i

3.2.1 Modélisation de la mesure de débit par la norme ISO 748

La norme NF EN ISO 748 est adaptée au jaugeage par exploration des vitesses au courantomètre (mesure de n valeurs de vitesses pendant un temps donné sur des verticales indépendantes), la figure 6 illustre l'exploration de la section. En général le courantomètre est placé sur une perche et déplacé de verticales en verticales. La norme ISO 748 préconise une propagation des erreurs de mesure, en distinguant les composantes aléatoire et systématique et suppose, pour quantifier certaines contributions, que le débit de référence peut être connu.

Le calcul d'un débit par la méthode d'exploration des vitesses est la somme des débits des sous sections j . A chaque sous section j est affectée une largeur b_i , une profondeur d_i et une vitesse v_i . Le calcul du débit peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i d_i v_i \quad (6)$$

L'incertitude-type composée relative de la mesure est donnée par la norme ISO 748 :

$$u'^2(Q) = u'_s{}^2 + u'_m{}^2 + \frac{\sum_{i=1}^m (b_i d_i v_i)^2 (u'_{b,i}{}^2 + u'_{d,i}{}^2 + u'_{v,i}{}^2)}{\left(\sum_{i=1}^m b_i d_i v_i \right)^2} \quad (7)$$

Pour un nombre de verticales $m > 10$ et un nombre de points n fixe par verticale, si les débits partiels à travers les sous-sections sont approximativement égaux, et si on considère que les composantes d'incertitudes sont approximativement égales d'une verticale à l'autre, alors on peut simplifier le calcul comme suit :

$$u'^2(Q) = u'_s{}^2 + u'_m{}^2 + \frac{1}{m} \left(u'_{b,i}{}^2 + u'_{d,i}{}^2 + u'_{p,i}{}^2 + \frac{1}{n} (u'_{c,i}{}^2 + u'_{e,i}{}^2) \right) \quad (8)$$

avec les composantes d'incertitude suivantes :

u'_m : incertitude due au nombre limité m de verticales qui correspond à l'erreur d'intégration transversale de d et v ;

u'_s : incertitude due aux corrections d'étalonnage du courantomètre et des instruments de mesure des largeurs et des profondeurs ;

u'_b : incertitude due à la mesure des largeurs entre verticales ;

u'_d : incertitude due à la mesure des tirants d'eau sur les verticales ;

u'_p : incertitude due au nombre de points limité sur la verticale qui correspond à l'erreur d'intégration verticale de v ;

u'_c : incertitude due aux erreurs aléatoires sur la vitesse (erreur instrumentale) ;

u'_e : incertitude due au temps limité d'exposition du courantomètre (erreur environnementale liée aux fluctuations de l'écoulement).

3.2.2 Limites de la norme ISO 748 dans le cas de l'ADCP mobile

Un jaugeage ADCP par « bateau mobile » diffère d'un jaugeage par exploration du champ des vitesses par verticales successives pour plusieurs raisons qui amènent à proposer une autre méthode d'évaluation des incertitudes :

- L'ADCP mesure une distribution de vitesses sur la verticale et pas un nombre limité de points comme un courantomètre dans le cas de l'application de formules algébriques. L'ADCP ne fait pas d'erreur d'intégration sur la partie mesurée, le terme u'_p et les valeurs proposées par la norme ISO 748 ne sont pas applicables pour les jaugeages ADCP.
- Les débits extrapolés en bas et en haut de la section peuvent représenter une proportion importante du résultat final. L'incertitude sur ces débits n'est pas prise en compte dans le calcul de la norme ISO 748. Cette incertitude devra être calculée.
- La géométrie de la section est mesurée de façon très différente (vitesse de déplacement du bateau, mesure de profondeur par ultrasons...). Dans le cas des jaugeages classiques, une mesure avec peu de verticales est directement pénalisée par le terme u'_m . Dans le cas de l'ADCP, le nombre de verticales est la plupart du temps très important donc l'incertitude sur la géométrie sera beaucoup plus faible.

L'ADCP est un outil de mesure qui utilise son propre modèle mathématique pour calculer le débit. La modélisation du mesurage est différente d'un jaugeage au courantomètre, l'équation de calcul du débit retenue sera donc celle du « bateau mobile ». Par conséquent, les composantes d'incertitudes ne seront pas exprimées de la même façon dans la méthode proposée.

3.3 Modélisation de la mesure de débit dans le cas de l'ADCP mobile

Le calcul du débit par ADCP mobile est donc la somme des débits extrapolés et du débit mesuré :

$$Q_{ADCP} = \sum_{i=1}^m (Q_i^{mes} + Q_i^{top} + Q_i^{bot}) + Q_{right} + Q_{Left} \quad (9)$$

Avec :

i : Chaque ensemble mesuré ;

Q_i^{mes} : Le débit mesuré par l'ADCP ;

Q_i^{top} : Le débit extrapolé en haut par l'équation en 1/m (ou autre option) ;

Q_i^{bot} : Le débit extrapolé en bas par l'équation en 1/m (ou autre option) ;

Q_{right} : Le débit extrapolé en rive droite par l'équation des bords ;

Q_{left} : Le débit extrapolé en rive gauche par l'équation des bords.

On a pour Q_i^{bot} l'expression suivante, obtenue en intégrant la loi puissance en $1/m$:

$$Q_i^{bot} = Q_i^{mes} \frac{(h - h_{top} - h_{mes})^{(m+1)/m}}{(h - h_{top})^{(m+1)/m} - (h - h_{top} - h_{mes})^{(m+1)/m}} \quad (10)$$

Avec :

h : la hauteur d'eau ;

h_{top} : la hauteur d'eau de la partie non mesurée en haut ;

h_{mes} : la hauteur d'eau de la partie mesurée.

Pour Q_i^{top} l'expression suivante, obtenue en intégrant la loi puissance en $1/m$:

$$Q_i^{top} = Q_i^{mes} \frac{h^{(m+1)/m} - (h - h_{top})^{(m+1)/m}}{(h - h_{top})^{(m+1)/m} - (h - h_{top} - h_{mes})^{(m+1)/m}} \quad (11)$$

Pour les berges Q_{right}

$$Q_{right} = C L_{right} V_{right} h_{right} \quad (12)$$

Avec :

C : Le coefficient de bord (0,35 pour une forme triangulaire, 0,91 pour une forme rectangulaire) ;

L_{right} : la laisse estimée ou mesurée par l'opérateur ;

V_{right} : la vitesse moyenne sur les derniers ensembles au bord ;

h_{right} : la hauteur moyenne sur les derniers ensembles au bord.

3.4 Expression de l'incertitude dans le cas de l'ADCP mobile

Le détail des calculs et les hypothèses est présenté en annexe 1.

L'équation 5 relative au débit mesuré à travers une cellule permet d'écrire :

$$u^2(Q_{mes}) = \sum_{i=1}^m (B_i q_i)^2 \left\{ u'^2(V_{b,i}) + \frac{1}{n_{bin}} \left[u'^2(V_i) + u'^2(V_i) r(V_i, V_i')(n_{bin} - 1) + \frac{1}{\tan^2(\alpha_i - \beta)} u'^2(\alpha_i - \beta) + u'^2(D_z) \right] \right\} \quad (13)$$

$B_i q_i$: Débit pour l'ensemble i ;

$u'(V_{b,i})$: incertitude sur la mesure de la vitesse de déplacement de l'ADCP pour l'ensemble i ;

n_{bin} : nombre de cellules par ensembles ;

$u'(V_i)$: incertitude sur la mesure de la vitesse moyenne de l'eau de l'ensemble ;

$r(V_i, V_i')(n_{bin} - 1)$: terme de corrélation dû aux mesures de vitesses corrélées entre deux ensembles successifs ;

$u(\alpha_i - \beta)$: incertitude sur les angles (direction de l'écoulement dans la cellule et direction de la vitesse du bateau) ;

$u'(D_z)$: incertitude sur la profondeur des cellules, mesurée par l'ADCP.

D'après les hypothèses de la norme ISO 748, d'Herschy (2002) et de l'annexe 1 : si les verticales de mesurage sont positionnées de telle sorte que les débits des éléments de section soient approximativement égaux et si les incertitudes composantes sont identiques d'une verticale à l'autre, l'équation peut être simplifiée comme suit :

$$u'^2(Q_{ADCP}) = u'^2_m + u'^2_s + u'^2_{exp} + u'^2_{proj} + \frac{1}{n_{ens}} \left\{ u'^2(V_b) + \frac{1}{n_{bin}} \left[u'^2(V_i) + u'^2(V_i) r(V_i, V_i')(n_{bin} - 1) + u'^2(h) \right] \right\} \quad (14)$$

Avec :

u'_s : incertitude sur les corrections d'étalonnage des capteurs ;

u'_{proj} : incertitude sur la géométrie de la section ;

$u'(V_b)$: incertitude sur la mesure de la vitesse de déplacement de l'ADCP ;

$u'(V_i)$: incertitude sur la mesure de la vitesse moyenne de l'eau de l'ensemble ;

$u'(h)$: incertitude sur l'évaluation de la hauteur d'eau ;

u'_{exp} : incertitude sur les débits extrapolés ;

n_{ens} : nombre total d'ensembles sur le transect ;

n_{bin} : nombre de cellules par ensemble ;

$r(V_i V'_i)(n_{bin} - 1)$: Terme de corrélation dû aux vitesses corrélées entre deux ensembles successifs.

3.5 Conclusion de la partie

L'ADCP est un appareil complexe. Les derniers modèles d'instruments des deux principaux fabricants d'ADCP ne nécessitent aucun réglage en arrivant sur le site de mesure. L'instrument s'adapte aux conditions d'écoulement. Ceci a pour conséquence d'éviter les erreurs de paramétrage.

Nous avons vu que la norme ISO 748 sur l'exploration du champ des vitesses n'est pas applicable directement pour l'évaluation des incertitudes des jaugeages ADCP mobile. Nous avons proposé une nouvelle expression de l'incertitude composée pour le jaugeage ADCP mobile. Il convient maintenant d'évaluer chaque composante d'incertitude.

4 Paramétrage de la méthode

4.1 Evaluation des incertitudes pour les jaugeages par ADCP mobile

Le tableau I récapitule les termes d'incertitude issus de l'équation 13, la définition et les sources d'erreurs. Des pistes d'évaluation sont proposées, ainsi que des valeurs issues de la littérature. Les parties grisées sont les options qui sont retenues pour l'évaluation de l'incertitude composée dans les exemples de la suite de cette étude.

Tab. 1 : Définition et type d'évaluation des termes de l'expression de l'incertitude composée $u_{(ADCP)}$

Terme	Définition	Sources d'erreur	Evaluation	Valeurs de la littérature
u'_m	Composante d'incertitude sur le nombre limité de verticales	Echantillonnage spatial insuffisant de la section de mesure. Variations de profondeur et de vitesse non linéaires entre les verticales.		Equation de Carter & Anderson (1963), Sauer (1992) Norme ISO 748 (2009)
u'_s	Composante systématique de l'incertitude sur la mesure de débit par ADCP mobile	Erreur d'étalonnage des différents capteurs de l'ADCP (céramiques, température, orientation, enfoncement de l'instrument)	Evaluation de type A d'après des mesures expérimentales en bassin d'étalonnage.	1 % Norme ISO 748 (2009), Herschy (2002) 0,51 %, 1,10 % (Oberg, 2007),
u'_{proj}	Composante aléatoire de l'incertitude sur la projection des vitesses dans le repère de l'ADCP	Erreur de projection de la vitesse de l'eau perpendiculairement à la vitesse du bateau. Erreurs de mesure des vitesses, hétérogénéité des vitesses. Erreur d'alignement des faisceaux.	Evaluation de type B d'après les évaluations de surface mouillée en modifiant les projections	
u'_{extp}	Composante systématique de l'incertitude des débits extrapolés en haut, en bas du profil et sur les bords	Erreur due au choix du modèle de distribution verticale des vitesses Erreur due aux phénomènes du champ proche et des réflexions secondaires Erreur due à la mesure de la laisse Erreur due au choix du coefficient de forme du bord	Evaluation de type B d'après le débit extrapolé en faisant varier la loi d'extrapolation, son coefficient, le coefficient de forme, et l'erreur sur la laisse	Tests de sensibilité (Hüchel, 2011)
$u'(V_b)$	Composante aléatoire de l'incertitude sur la mesure de vitesse de l'ADCP par rapport au fond	Erreur sur l'évaluation de la vitesse de l'ADCP (Suivi de fond perturbé par la végétation)		Evaluation d'après la formule d'incertitude du bottom track (RDI 1997)
$u'(V)$	Composante aléatoire de l'incertitude sur l'intensité de la vitesse de l'eau	Erreur liée à la vélocimétrie Doppler.	Evaluation par le logiciel de simulation de déploiement : PlanADCP.exe	
$u'(h)$	Composante aléatoire de l'incertitude sur la mesure de hauteur d'eau	Erreur sur la vitesse du son dans l'eau Erreur due à la configuration des faisceaux et au fond hétérogène	Evaluation de type A d'après des mesures expérimentales en bassin d'étalonnage ou par comparaison avec une méthode de référence.	2 %, (Simpson, 2001) <2 %, (Lamy, 2009) 1 % (Pierrefeu, 2009)
$r(V_i, V_{i'})$	Coefficient de corrélation des vitesses d'ensembles successifs	Erreur due au recouvrement des faisceaux lors des mesures d'ensembles successifs	Evaluation de la variance composée selon le GUM	0,4 (Muste, 2009) -1 < valeur < 1 (GUM, 1999)

4.2 Evaluation des composantes d'incertitude et critères de post-traitements

La modélisation du mesurande et l'expression de l'incertitude sur cette mesure de débit ont été décrites dans le début de cette étude. Le tableau I évoque les pistes d'évaluation que nous allons suivre pour évaluer chaque composante.

4.2.1 u'_s : Composante due aux corrections d'étalonnage des instruments

La valeur de 1 % est proposée par les normes de référence (ISO 748 ; ISO 5168) et reprise dans la littérature (Herschy, 2002 ; Sontek, 2007).

Les termes composant l'incertitude systématique sont issus de la modélisation du mesurage (équation 5). Cette incertitude peut être décomposée comme suit :

$$u'_s = \sqrt{u'^2(V_{bm}) + u'^2(V_m) + u'^2(h_m)} \quad (15)$$

Avec :

$u(V_{bm})$: l'incertitude due à la sensibilité variable du capteur pour le suivi de fond,

$u(V_m)$: l'incertitude due à la sensibilité variable de l'instrument de mesure de la mesure de la vitesse de l'eau,

$u(h_m)$: l'incertitude due à la sensibilité variable de l'instrument de mesure des profondeurs,

- $u(V_{bm})$: l'incertitude due à la sensibilité variable du capteur pour le suivi de fond,

L'incertitude due à la sensibilité variable du suivi de fond par l'ADCP a été évaluée par Oberg (2007) suite à des travaux en bassin d'étalonnage : il obtient la valeur de $u(V_{bm}) = 0,51$ % (avec $k=2$).

- $u(V_m)$: l'incertitude due à la sensibilité variable de l'instrument de mesure de la mesure de la vitesse de l'eau,

L'incertitude due à la sensibilité variable de l'instrument de mesure de la mesure de la vitesse de l'eau a été évaluée par Oberg (2007) suite à des travaux en bassin d'étalonnage, il obtient la valeur de $u(V_m) = 1,10 \%$ (avec $k=2$).

- $u(h_m)$: l'incertitude due à la sensibilité variable de l'instrument de mesure des profondeurs

La composante systématique de l'erreur sur la profondeur est principalement due à l'enfoncement du capteur dans l'eau. La mesure de l'enfoncement du capteur est réalisée avant le jaugeage ADCP par un opérateur, qui va mesurer (la plupart du temps avec un mètre à ruban) la distance entre le centre d'une céramique et la surface libre du cours d'eau.

Cette mesure manuelle effectuée sur un bateau libre avec une surface de l'eau qui oscille un peu est entachée d'erreur. L'erreur d'enfoncement communément acceptée par les utilisateurs est de 4cm pour un jaugeage en bateau sur grand cours d'eau et 2 cm pour un jaugeage avec un mini support de flottaison et son ADCP sur petite rivière. Dans le cadre d'une évaluation de type B, conformément au § 4.3.4 du GUM, ces valeurs (avec $k=2$) sont rapportées en valeur d'incertitude-type par :

$$u(h_m) = \frac{0,04}{1,96} \quad (16)$$

L'incertitude relative sera :

$$\text{et } u'(h_m) = \frac{u(h_m)}{h_{moy}} \quad (17)$$

Avec h_{moy} la hauteur d'eau moyenne dans la section de mesure considérée.

4.2.2 u'_m : Composante sur le nombre de verticales

L'équation 13 et son résultat sont largement influencés par le nombre de verticales m . Il a une influence directe sur le terme u'_m et il pondère une partie du calcul. Plusieurs auteurs depuis Carter & Anderson (1963) repris par Sauer, (1992) proposent des valeurs reliant l'incertitude au nombre de verticales selon l'équation :

$$u'_m = 32 \times m^{-0.88} \quad (18)$$

Avec :

m : le nombre de verticales.

On applique le calcul de l'incertitude de la Norme ISO 748 (équation 8) à l'exemple donné dans cette même norme avec des valeurs représentatives d'un jaugeage au moulinet. La figure 10 représente l'évolution de l'incertitude-type composée en fonction du nombre de verticales dans le cadre de cet exemple. On remarque que le nombre de verticales a une influence considérable sur le résultat du calcul d'incertitude.

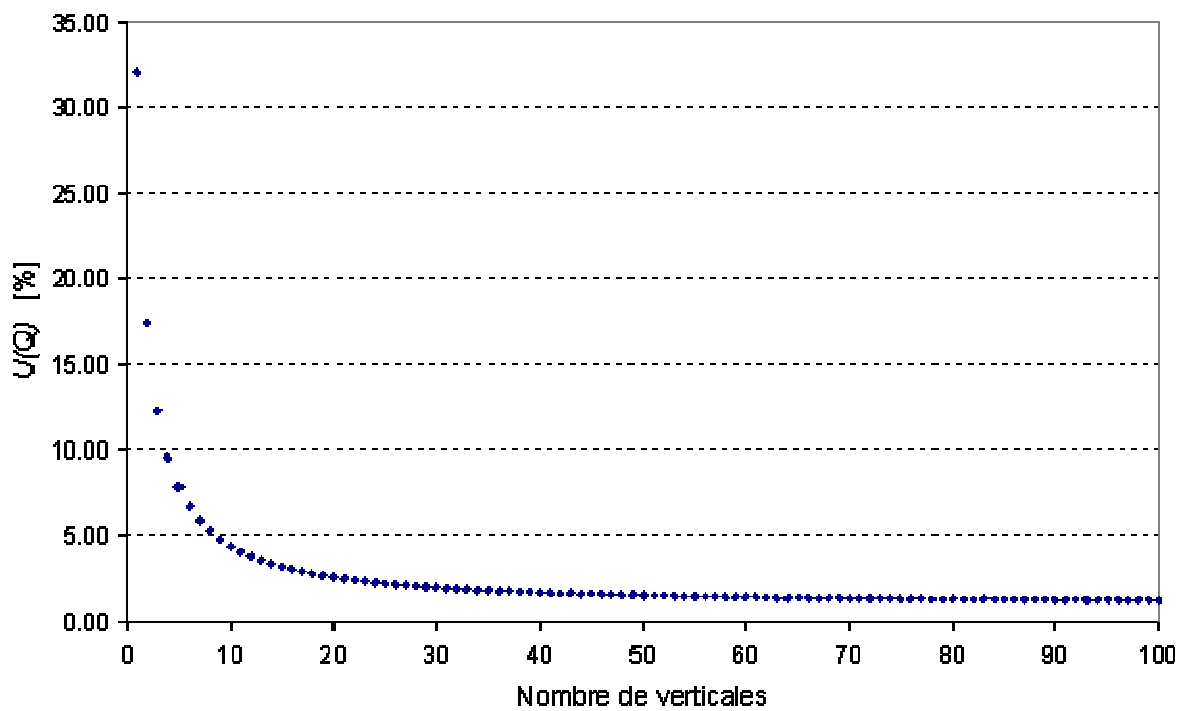


Fig. 10 : Evolution de l'incertitude type composée en fonction du nombre de verticales

4.2.3 u'_{proj} : Composante aléatoire de l'incertitude sur la projection des vitesses dans le repère de l'ADCP

L'ADCP peut déterminer dans son repère la direction et l'intensité moyenne du courant et son déplacement par rapport au fond du cours d'eau.

Le logiciel de post-traitement des données ADCP (Winriver II) permet de déterminer des valeurs de surface mouillée selon deux principes de traitement. Les segments successifs de déplacement de l'ADCP peuvent être projetés soit perpendiculairement au flux moyen soit parallèlement à la trajectoire principale. Le premier principe (perpendiculaire au flux) intègre tous les petits déplacements et les problèmes d'angles qui peuvent avoir lieu pendant la traversée. Le deuxième principe (parallèle à la trajectoire principale) va permettre de projeter le transect et de fournir une mesure géométrique de la section mouillée dans l'axe de la traversée, sans inclure les erreurs de projection des vitesses d'écoulement. L'incertitude type u'_{proj} va être déterminée en utilisant ces deux types de projection.

Soit un jaugeage ADCP constitué de six traversées. On va comparer le carré des coefficients de variation (rapport entre l'écart type et la moyenne) des surfaces mouillées obtenues par les deux méthodes. Ces deux coefficients sont notés :

- CV_p : pour le coefficient de variation des aires calculées parallèlement au déplacement ;
- CV_n : pour le coefficient de variation des aires calculées perpendiculairement au flux moyen.

Si $CV_n^2 \approx CV_p^2$

Si ces coefficients de variation sont proches, on négligera alors l'incertitude u'_{proj}

Cependant si la comparaison rend compte de la condition suivante : $\frac{CV_n}{CV_p} > 10$, alors on prendra

comme incertitude $u'_{proj} = CV_n$, qui permet de prendre en compte l'erreur de projection.

4.2.4 $u'(V_b)$: Composante aléatoire de l'incertitude sur la mesure de vitesse de l'ADCP par rapport au fond

Nous disposons de données fournies par le constructeur sur l'incertitude de la vitesse du bateau par rapport au fond. La vitesse de l'ADCP par rapport au fond pour un ensemble est le résultat de mesures sur chaque faisceau et de formules trigonométriques. L'incertitude, en cm/s, sur cette vitesse est égale à :

$$u(V_{bi}) = 0,0003V + \frac{a + 0,003V_{bi}}{1 + bAf} \quad (19)$$

L'incertitude type relative sera :

$$u'(V_{bi}) = \frac{u(V_{bi})}{V_{bi}} \quad (20)$$

où :

a : 1cm/s;

b : 0,0001 kHz⁻¹m⁻¹;

A : profondeur sous les transducteurs en mètres ;

f : fréquence de l'appareil en kHz ;

V_{bi} : vitesse de l'ADCP par rapport au fond pour l'ensemble considéré, en cm/s.

Il s'agit d'une formule obtenue de façon empirique. Elle est valable pour les ADCP broadband mais sera aussi étendue aux autres modèles. Le tableau II présente quelques valeurs de $u'(V_b)$ pour plusieurs vitesses de déplacement du bateau et des hauteurs d'eau différentes. On remarque que l'incertitude sur V_b diminue avec l'intensité de la vitesse V_b et également lorsque la profondeur augmente dans la section.

Certains utilisateurs (Choquette, 2010), recommandent de respecter un ratio $\frac{\text{vitesse bateau}}{\text{vitesse eau}} \leq 0,5$

pour une mesure ADCP optimale. En effet une vitesse de déplacement du bateau excessive entraîne des pertes d'ensembles et une instabilité forte du capteur. Cette consigne n'est pas toujours facile à respecter surtout dans le cas des écoulements très lents. La régularité de la vitesse de traversée reste la recommandation la mieux partagée dans la communauté des hydromètres.

Tab. II : Incertitude sur la vitesse ADCP/Fond en cm/s pour un ADCP 1200 kHz

ADCP Rio Grande 1200 kHz														
Vitesse V_b (m/s)	Hauteur d'eau sous le capteur (m)													
	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10
0,1	1,02	0,97	0,92	0,88	0,83	0,80	0,76	0,70	0,65	0,60	0,56	0,53	0,50	0,47
0,2	1,05	1,01	0,95	0,90	0,86	0,82	0,79	0,72	0,67	0,62	0,58	0,55	0,52	0,49
0,3	1,09	1,04	0,98	0,93	0,89	0,85	0,81	0,75	0,69	0,64	0,60	0,57	0,53	0,50
0,4	1,12	1,07	1,01	0,96	0,92	0,87	0,84	0,77	0,71	0,66	0,62	0,58	0,55	0,52
0,5	1,15	1,10	1,04	0,99	0,94	0,90	0,86	0,79	0,73	0,68	0,64	0,60	0,57	0,54
0,6	1,18	1,13	1,07	1,02	0,97	0,93	0,89	0,82	0,76	0,70	0,66	0,62	0,59	0,55
0,7	1,22	1,16	1,10	1,05	1,00	0,95	0,91	0,84	0,78	0,72	0,68	0,64	0,60	0,57
0,8	1,25	1,19	1,13	1,07	1,02	0,98	0,94	0,86	0,80	0,74	0,70	0,66	0,62	0,59
0,9	1,28	1,23	1,16	1,10	1,05	1,00	0,96	0,89	0,82	0,77	0,72	0,67	0,64	0,60
1	1,31	1,26	1,19	1,13	1,08	1,03	0,99	0,91	0,84	0,79	0,74	0,69	0,66	0,62
1,1	1,35	1,29	1,22	1,16	1,11	1,06	1,01	0,93	0,86	0,81	0,76	0,71	0,67	0,64
1,2	1,38	1,32	1,25	1,19	1,13	1,08	1,04	0,95	0,89	0,83	0,78	0,73	0,69	0,65
1,3	1,41	1,35	1,28	1,22	1,16	1,11	1,06	0,98	0,91	0,85	0,79	0,75	0,71	0,67
1,4	1,45	1,38	1,31	1,25	1,19	1,13	1,09	1,00	0,93	0,87	0,81	0,77	0,72	0,69
1,5	1,48	1,41	1,34	1,27	1,21	1,16	1,11	1,02	0,95	0,89	0,83	0,78	0,74	0,70

4.2.5 $u'(V)$: Composante aléatoire de l'incertitude sur la mesure de vitesse de l'eau

L'incertitude liée aux effets aléatoires de la mesure ADCP dépend d'un certain nombre de facteurs :

- Le mode de mesure
- La taille des cellules
- Le nombre de pings moyennés pour la mesure d'un ensemble.

Le logiciel PlanADCP développé par TRDI est un simulateur de déploiement des profileurs de courant, qui permet à partir de la configuration choisie de déterminer l'écart type expérimental $\sigma_{planADCP}$ sur la mesure de vitesse. TRDI ne diffuse pas le modèle mathématique qui permet l'évaluation de ce paramètre mais donne accès librement aux clients à son logiciel. Le tableau III donne des valeurs d'incertitude pour des déploiements habituels. La valeur est à calculer pour chaque déploiement.

L'incertitude $u(V)$ s'écrit alors $u(V) = \sigma_{planADCP}$

L'incertitude type relative sera :

$$u'(V) = \frac{u(V)}{V_{moy}} \quad (21)$$

avec :

$\sigma_{planADCP}$: L'écart-type sur la vitesse donné par PlanADCP.exe selon les paramètres de déploiement,

V_{moy} : La vitesse moyenne du jaugeage considéré.

Tab. III : Incertitude sur la vitesse de l'eau par rapport à l'ADCP

ADCP Rio Grande 1200 kHz								
Taille de cellule (m)	Incertitude pour 1 ping par ensemble (cm/s) (WP1)				Incertitude pour 5 ping par ensemble (cm/s) (WP5)			
	Mode 1	Mode 5	Mode 8	Mode 12	Mode 1	Mode 5	Mode 8	Mode 12
0,05	44,9	0,60	7,13	18,35	20,1	0,27	3,19	8,21
0,1	31,1	0,44	5,15	12,69	13,9	0,20	2,30	5,68
0,2	23,1	0,27	3,22	9,42	10,3	0,12	1,44	4,21
0,25	13,6	0,24	2,78	5,57	6,10	0,11	1,24	2,49
0,3	12,7	0,21	2,51	5,18	5,68	0,10	1,12	2,32
0,4	8,94	0,19	2,25	3,65	4,00	0,09	1,01	1,63
0,5	6,95	0,18	2,16	2,84	3,11	0,08	0,96	1,27
0,6	6,45	0,18	2,12	2,63	2,88	0,08	0,85	1,18
0,7	5,34	0,18	2,11	2,18	2,39	0,08	0,94	0,98
1	3,54	0,18	2,10	1,45	1,58	0,08	0,94	0,65

Les modes de mesure sont définis par un protocole de tir d'impulsions acoustiques lié à une stratégie d'analyse du signal renvoyé au transducteur. Ils sont choisis lors du paramétrage du capteur. Voici le descriptif rapide des modes évoqués dans le tableau III.

Mode 1 : il est adapté aux environnements difficiles (turbulences, courants de cisaillement) et convient pour les cours d'eau profonds. C'est le mode le plus robuste.

Mode 5 : il est utilisé dans les cours d'eau peu profonds. Il est efficace lorsque le courant est faible (moins de 1 m/s) mais il ne convient pas en écoulement turbulent.

Mode 8 : il est plus souple que le précédent. Il permet des mesures jusqu'à 2 m/s. Il convient à des mesures en eau peu profonde avec écoulement turbulent.

Mode 12 : il correspond au mode haute résolution, c'est le mode d'acquisition qui permet la mesure de vitesse de l'eau la moins dispersée, il est conseillé par TRDI.

On observe que quel que soit le mode utilisé, il faut augmenter la taille de la cellule pour faire baisser l'incertitude de la mesure de la vitesse de l'eau par rapport à l'ADCP dans cette cellule.

4.2.6 $u'(h)$: Composante aléatoire de l'incertitude sur la mesure de hauteur d'eau

4.2.6.1 Les sources d'erreur

L'incertitude sur la mesure de hauteur d'eau par l'ADCP a plusieurs composantes qui peuvent être quantifiées expérimentalement. Les différentes sources d'erreur sont :

- La configuration Janus des faisceaux en particulier lorsque le fond du cours d'eau n'est pas homogène :

L'erreur due à la configuration des faisceaux est aléatoire. Elle est liée au fait que pour chaque mesure de profondeur l'ADCP effectue une moyenne des données issues de ses quatre faisceaux. La plupart du temps, cette moyenne est très proche de la profondeur réelle mais dans les cas où le fond est accidenté, l'erreur augmente. Les dernières générations d'ADCP Sontek sont équipées d'un sonar vertical central qui permet de faire une mesure directe de la profondeur sans moyennage.

- Le tangage et le roulis

Le tangage et le roulis sont deux mouvements du bateau qui influent sur la verticalité de l'axe de l'ADCP. L'ADCP intègre un inclinomètre qui mesure les deux angles d'assiette (tangage) et de gîte (roulis) pour chaque ensemble.

- Le pilonnement

Un autre mouvement de l'embarcation sur l'eau est le pilonnement ; il s'agit de la variation de l'enfoncement du transducteur sous la surface de l'eau, au cours du levé. Ce phénomène n'est pas corrigé dans les mesures ADCP. L'enfoncement du capteur dans l'eau est renseigné au début des mesures. Le pilonnement va dépendre des conditions d'écoulement, de la vitesse de déplacement du bateau, du type de support utilisé pour déployer le capteur.

4.2.6.2 Les valeurs de la norme

Dans la norme ISO 748 l'annexe E propose des niveaux d'incertitude relative et absolue ($k=1$, niveau de confiance de 68 %) en fonction de la plage de profondeur explorée avec perche de sondage ou ligne de sonde. Les valeurs sont reprises dans le tableau IV. Le matériel étant très différent, ces valeurs ne seront pas retenues pour l'évaluation de $u'(h)$ pour le jaugeage ADCP.

Tab. IV : Exemple d'incertitudes dans les mesurages de profondeur ($k = 1$)

Plage de profondeur (m)	Incertitude absolue (m)	Incertitude relative (%)
0,4 à 6	0,02	0,65
6 à 14	0,025	0,25

4.2.6.3 Les valeurs expérimentales

La mesure de profondeur à l'ADCP a été contrôlée à plusieurs reprises sur le terrain et en laboratoire dans différentes configurations. Son incertitude est estimée à 2 % par Simpson (2001). Lamy (2009) a calculé que dans des conditions de jaugeage et pour des mesures de profondeur supérieures à 1m, l'incertitude sur la mesure de profondeur est inférieure à 2 %.

Pierrefeu (2009) après différents essais dans des canaux et écluses du Rhône obtient une valeur de $u'(h) = 1 \%$ (pour $k=2$). Cette valeur sera retenue pour le calcul de l'incertitude sur le jaugeage.

4.2.7 u'_{exp} : Composante systématique sur les débits extrapolés

La partie extrapolée n'est pas prise en compte dans le calcul d'incertitude de la norme ISO 748, il paraît pourtant important de la prendre en compte.

L'incertitude sur le débit en haut du profil $u'(Q^{top})$ va varier en fonction de la loi d'extrapolation choisie (Cf. 3.1.4). On émet l'hypothèse que le profil ne suit pas toujours une loi puissance jusqu'en haut, on teste donc les trois lois proposées par Winriver II. L'incertitude sur le débit en bas du profil $u'(Q^{bot})$ va varier en fonction du coefficient m choisi pour la loi d'extrapolation puissance (il sera choisi entre 4 et 10 conformément aux options prises par la norme ISO 748 pour le calcul de la vitesse au fond). Les incertitudes sur les débits en berge ($u'(Q^{right}), u'(Q^{left})$) vont varier en fonction du coefficient de forme choisi et de l'erreur sur l'estimation de la laisse.

La composante u'_{exp} sera traitée comme une incertitude de type B, en utilisant les limites (supérieure et inférieure) du débit total selon les choix d'extrapolation conformément au § 4.3.7 du GUM, soit :

$$u^2 = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12} \quad (22)$$

Avec a_+ et a_- les limites de l'intervalle associé à une loi de distribution rectangulaire.

On obtient la combinaison suivante pour l'incertitude-type :

$$u_{exp} = \frac{[\max(Q^{top}) + \max(Q^{bot}) + \max(Q^{right}) + \max(Q^{left})] - [\min(Q^{top}) + \min(Q^{bot}) + \min(Q^{right}) + \min(Q^{left})]}{2\sqrt{3}} \quad (23)$$

L'incertitude relative s'écrit :

$$u'_{exp} = \frac{u_{exp}}{Q_{ADCP}} \quad (24)$$

Avec Q_{ADCP} le débit total du jaugeage considéré.

4.2.8 Terme sur les grandeurs d'entrée corrélées

Dans notre méthode, on considère un ensemble mesuré par ADCP comme une verticale. Cependant les mesures d'ensembles sont corrélées entre elles à cause des faisceaux divergents ; en effet au fur et à mesure de la traversée, les faisceaux vont mesurer plusieurs fois les mêmes parties de la section (il y a recouvrement spatial des faisceaux). Le GUM nous dit que les corrélations entre grandeurs d'entrée ne peuvent être ignorées si elles sont présentes et significatives. Le terme de corrélation est intégré dans le calcul de $u'^2(Q_{ADCP})$ conformément au GUM, les détails du calcul sont intégrés à l'annexe 1.

5 Résultats et discussions

5.1 Application de la méthode sur des exemples de jaugeage

5.1.1 Récapitulatif des résultats

Dans cette partie, nous allons faire des tests de la méthode et des options choisies pour des configurations de cours d'eau différentes et représentatives des différents cas rencontrés sur le terrain. Le tableau V décrit le jeu de données testé et donne les résultats d'évaluation de l'incertitude élargie. Quelques exemples typiques sont ensuite détaillés et discutés, ceux qui ne le sont pas dans cette partie sont décrits en annexe 2.

Les données ADCP sont exportées depuis le logiciel Winriver II en format ASCII puis exploitées dans un tableur où les calculs de la méthode sont implémentés. Seuls les résultats sont présentés ici. Un protocole d'exploitation des données est présenté en annexe 3.

Tab. V : Résultats d'application de la méthode d'évaluation des incertitudes sur les jaugeages par ADCP mobile

Code	Site / Rivière	Date	Capteur *	Dimensions de la section : Largeur / profondeur moyenne (m)	Débit (m ³ /s)	Dispersion des 6 transects. (Débit moyen/écart type) (%)	Ratio Q _{extp} /Q _{tot} (%) **	Incertitude élargie (k=2) (%)
BEA	Beucaire / Rhône	12/2008	BB 600	330 / 15,6	9030	3	16	4,8
RQ1	Roquemaure / Rhône	12/2010	BB 600	450 / 6,67	4340	1	23	4,5
RQ2	Roquemaure / Rhône	12/2010	BB 600	450 / 6,67	4330	6	31	5,1
PIE	Pierrelatte/ Rhône	04/2009	RG 1200	140 / 14,1	1230	1	18	4,6
JON	Jons / Rhône	10/2010	RG1200	120 / 2,83	453	1	43	6,2
PY1	Pyrimont / Rhône	10/2010	RG 1200	80 / 3,20	217	1	26	3,9
GE3	Genissiat / Rhône	10/2010	BB600	60 / 6,20	209	8	32	7,3
ROM	Romans sur Isère / Isère	11/2009	RG 1200	90 / 3,45	157	1	28	7,0
VAR	Varambon / Suran	11/2009	SP 2400	30 / 1,73	14,6	3	35	6,1
CAD	Caderousse / Rhône	09/2010	RG 1200	240 / 4,80	11,4	47	27	48
STJ	Saint Jean du Bruel / Dourbie	03/2010	SP 2400	15 / 0,70	2,59	2	37	3,8
NAN	Nant / Durzon	03/2010	SP 2400	5 / 0,75	1,37	1	37	5,4
CHA	Charbonnières les bains / Charbonnières	03/2010	SP 2400	6 / 0,43	0,55	4	61	11

* BB 600 pour ADCP Broad band 600 kHz, RG 1200 pour ADCP Rio Grande 1200 kHz et SP 2400 pour ADCP Stream Pro 2400 kHz.

** Souvent on présente plutôt le ratio Q_{mes}/Q_{tot} qui représente la proportion de débit mesuré

5.1.2 L'exemple de Roquemaure : RQ1 & RQ2

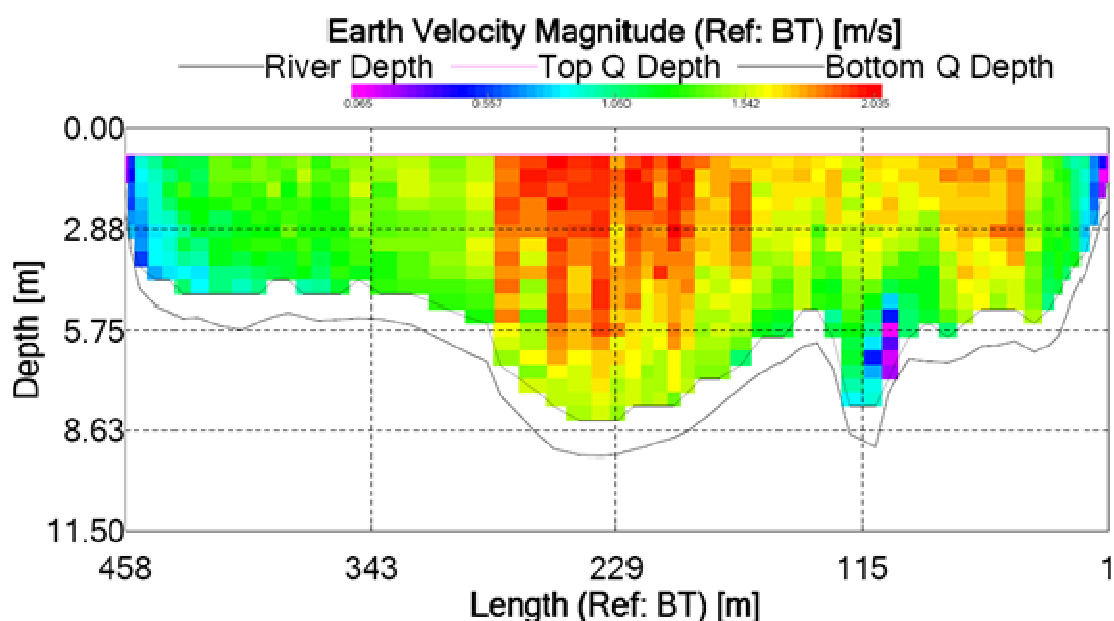


Fig. 11 : Profil (moyenné sur 3 ensembles) de vitesses à Roquemaure (Echelle de vitesses de 0 à 2m/s) ADCP Broad Band 600kHz (données CNR)

Exemple du Rhône à Roquemaure le 08 décembre 2010 (données CNR) : 14 traversées ont été réalisées pendant une phase de baisse du débit. On a un peu de dispersion dans les mesures (3 %). La section est un peu chahutée au fond, elle fait 450m de long et jusqu'à 10m de profondeur, les vitesses sont assez fortes au centre de la section (2 m/s) mais l'écoulement est cohérent. L'incertitude élargie ($k=2$) est de 4,5 %.

La méthode est testée pour deux séries de 6 jaugeages, l'une à débit stable RQ1 (dispersion 1 %) et l'autre avec les valeurs les plus dispersées possibles (6 %) RQ2. On a pour ce jaugeage entre 20 et 30 % de débit extrapolé. Le fait de prendre un échantillon plus dispersé fait augmenter l'incertitude élargie de 0,5 % ce qui est négligeable (Tab. V).

Voyons comment se comportent les différentes composantes d'incertitudes pour cet exemple (Tab. 7 & Fig. 12) :

- Le terme u'_s vaut 1,47 % pour ce jaugeage mais cette valeur sera valable pour tous les jaugeages avec cette méthode car en effet seule la composante $u'_{(hm)}$ peut varier extrêmement faiblement d'un cas à l'autre.
- La sensibilité de la composante u'_{extp} est cohérente pour ce jaugeage. Son poids est très fort dans le résultat final mais cela semble justifié (31 % d'extrapolation). C'est le terme u'_{extp} qui augmente dans le cas de RQ2 et qui permet d'obtenir une incertitude élargie un peu plus importante que pour RQ1.
- Le terme de projection est négligé car la condition exposée dans la partie 4.2.3 est respectée ($CVn^2 \approx CVp^2$).
- Le terme u'_m est quasi négligeable car les 6 transects comportent une moyenne de 252 ensembles bruts ce qui permet de pondérer le terme. Les autres composantes sont rendues négligeables par le nombre important de verticales/ensembles.

Tab. VI : Résultats pour RQ1

Composantes	% du Débit	% de $U^2(Q)$
u'^2s	1,47	29%
u'^2proj	0,00	0%
$u'^2(Vb)$	2,56E-07	0%
$u'^2(V)$	3,33E-06	0%
$u'^2(h)$	7,87E-04	0%
u'^2extp	3,59	70%
u'^2m	0,07	1%
Corrélation	1,62E-03	0%
$u_c'^2$	5,1	
$\sqrt{u_c'^2}$	2,27	
Résultats		
$U' (k=2)$	4,5	%
$U (k=2)$	197	m^3/s
$Q (ADCP)$	4340	m^3/s

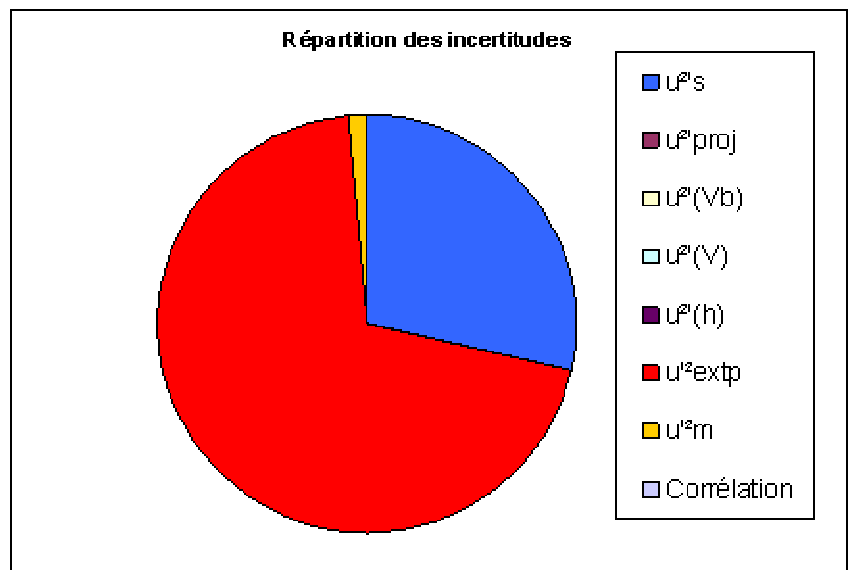


Fig. 12 : Répartition des composantes d'incertitudes pour le jaugeage RQ1

5.1.3 L'exemple de Pierrelatte : PIE

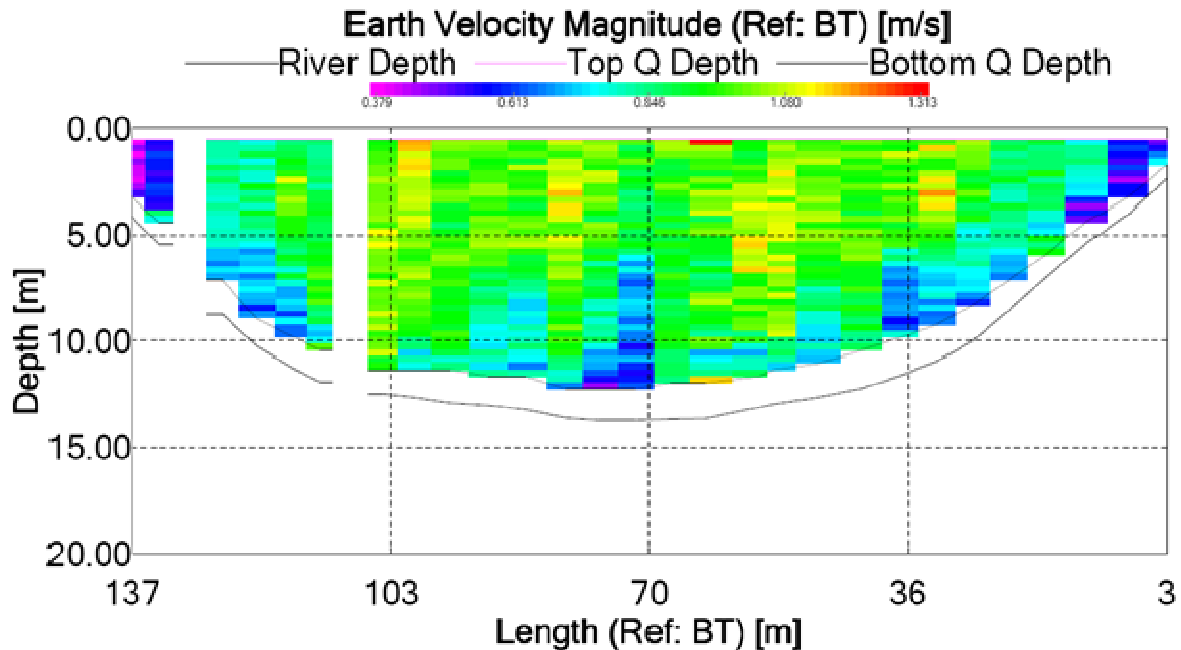


Fig. 13 : Profil de vitesses de Pierrelatte (Echelle de vitesses de 0,3 à 1,3m/s) ADCP Rio Grande 1200 kHz (données Cemagref)

Exemple du canal de dérivation du Rhône à Pierrelatte le 22 avril 2009 (Données Cemagref) : 6 traversées sont réalisées dans des conditions difficiles (vent, houle) avec 1 % de dispersion entre les valeurs de débit. Les conditions difficiles obligent à naviguer plus vite (vitesse bateau > 1m/s), les profils comportent donc moins d'ensembles que dans des conditions plus calmes. L'incertitude élargie est de 4,61 % (k=2) pour ce jaugeage.

Voyons comment se comportent les différentes composantes d'incertitudes pour cet exemple (Tab. 8 & Fig. 14) :

- La sensibilité de la composante u'_{exp} est cohérente pour ce jaugeage. Son poids est plus faible que dans l'exemple précédent car on a seulement 18 % d'extrapolation.
- Le terme de projection est négligé car la condition exposée dans la partie 4.2.2 est respectée ($CVn^2 \approx CVp^2$).

- Le terme u'_m est plus important dans ce jaugeage. En effet seulement 52 ensembles ont été mesurés, malgré cela les autres composantes sont rendues quasi négligeables car pondérées par le nombre d'ensembles.

Tab.VII : Résultats pour PIE

Composantes	% du Débit	% de $U'^2(Q)$
u'^2s	1,47	28%
u'^2proj	0,00	0%
$u'^2(Vb)$	2,01E-07	0%
$u'^2(V)$	3,40E-06	0%
$u'^2(h)$	1,67E-03	0%
u'^2extp	2,89	54%
u'^2m	0,95	18%
Corrélation	7,21E-03	0%
$u_c'^2$	5,3	
$\sqrt{u_c'^2}$	2,3	
Résultats		
U' (k=2)	4,6	%
U (k=2)	56.6	m^3/s
Q (ADCP)	1230	m^3/s

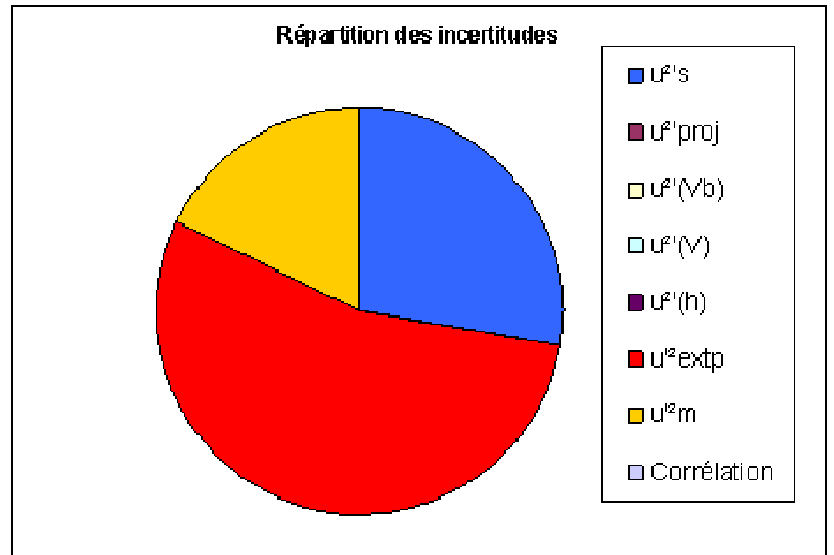


Fig. 14 : Répartition des composantes d'incertitudes pour le jaugeage PIE

5.1.4 L'exemple de Romans sur Isère : ROM

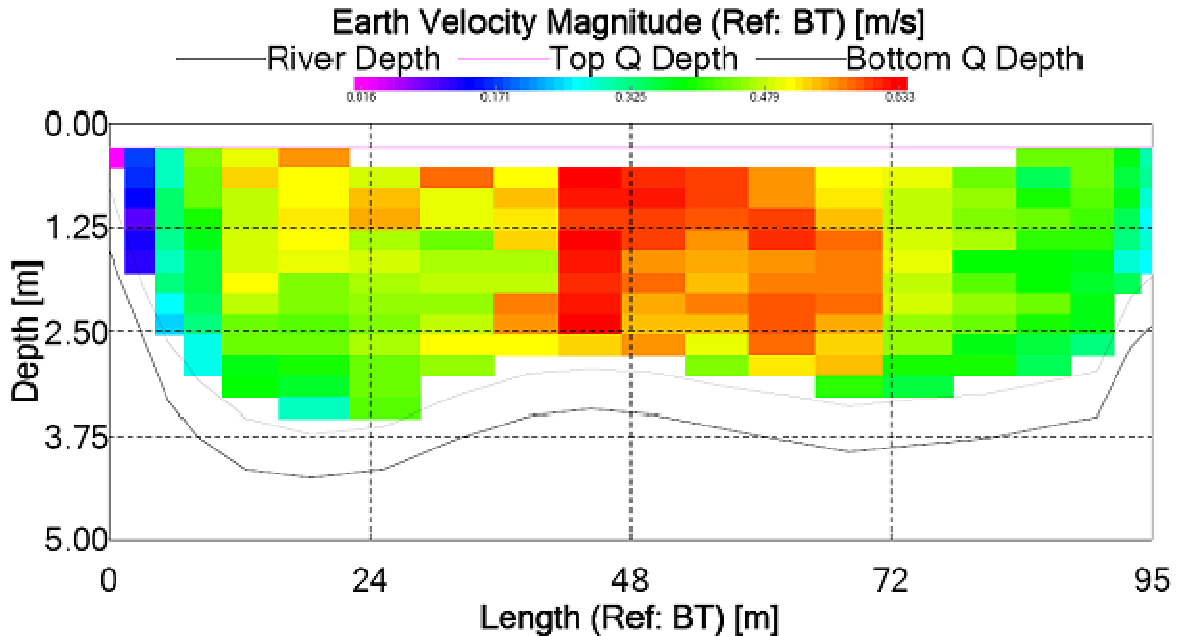


Fig. 15 : Profil de vitesses à Romans sur Isère (Echelle de vitesses de 0 à 0,6m/s) ADCP Rio Grande 1200 kHz (données Cemagref)

Dans cet exemple les conditions de mesure sont idéales. La dispersion des mesures de débit des différentes traversées est de 1 %. La partie extrapolée n'est pas trop importante (28 %) pourtant on arrive à une incertitude élargie ($k=2$) de plus de 7 %.

- u'_{extp} et u'_{proj} se comportent comme dans l'exemple précédent.
- Le terme u'_m est plus important dans ce jaugeage. En effet seulement 20 ensembles ont été mesurés, on a donc moins de mesures de vitesses, ce qui pénalise fortement l'évaluation. Dans ce cas-là, l'ADCP est réglé pour moyenniser un certain nombre de données à l'acquisition (typiquement 5 ensembles) ce qui permet d'obtenir un profil de vitesses moins bruité. Il serait donc peut-être plus intéressant d'enregistrer tous les ensembles possibles et de moyenniser éventuellement ensuite en post traitement. Si les 100 ensembles avaient été enregistrés et pris en compte dans le calcul, l'incertitude élargie sur ce

jaugeage serait de 5,4 % (k=2) ce qui semble plus juste étant donné la qualité de ce jaugeage.

Tab. VIII : Résultats pour ROM

Composantes	% du Débit	% de $U^2(Q)$
u^2_s	1,47	12%
u^2_{proj}	0,00	0%
$u^2(Vb)$	1,94E-06	0%
$u^2(V)$	1,40E-05	0%
$u^2(h)$	1,07E-02	0%
u^2_{extp}	5,57	45%
u^2_m	5,25	43%
Corrélation	1,79E-02	0%
$u_c'^2$	12	
$\sqrt{u_c'^2}$	3,5	
Résultats		
U' (k=2)	7,0	%
U (k=2)	11.0	m³/s
Q (ADCP)	157	m³/s

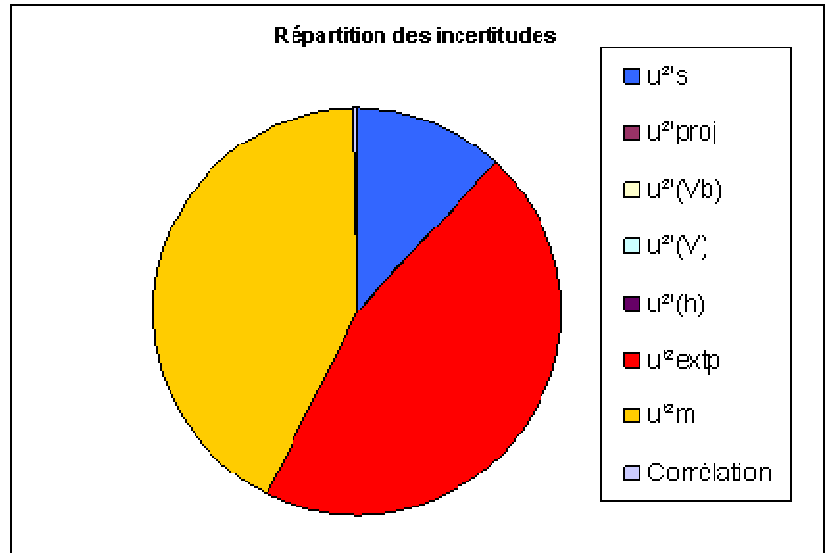


Fig. 16 : Répartition des composantes d'incertitudes pour le jaugeage ROM

5.1.5 L'exemple de Caderousse : CAD

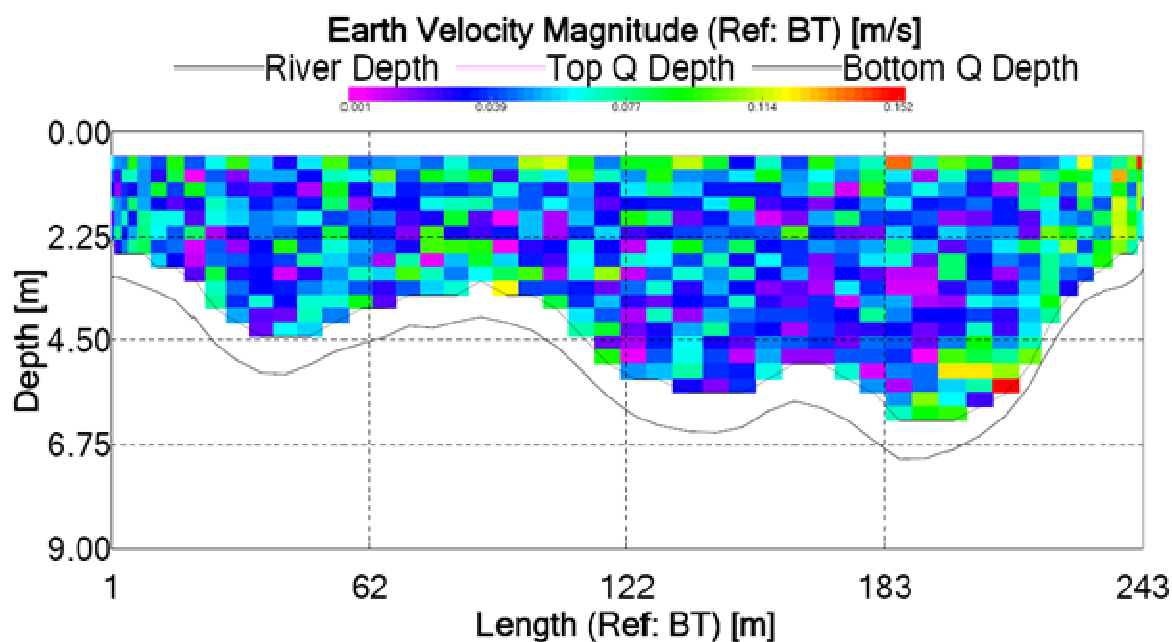


Fig. 17 : Profil de vitesses à Caderousse (Echelle de vitesses de 0 à 0,1m/s) ADCP Rio Grande 1200 kHz (données CNR)

Cette section de mesure est située en aval direct du barrage de Caderousse les vitesses sont très faibles et la section assez grande. Dans cet exemple l'incertitude élargie ($k=2$) est de 48 %. La CNR n'a pas validé ce jaugeage et l'a écarté de sa base de données.

- La partie extrapolée représente près de 27 % du débit total. La dispersion du débit est très forte : 47 %. Le terme u'_{exp} représente une forte contribution à l'incertitude totale sur ce jaugeage.
- Le terme de projection u'_{proj} avait été négligeable dans les exemples précédents, dans ce cas là CV_n est 25 fois plus grand que CV_p . Le terme u'_{proj} prend donc la valeur du coefficient de variation des aires mesurées perpendiculairement au flux, cette forte contribution est due aux vitesses très faibles et au champ de vitesse très dispersé.
- Le terme u'_m est ici négligeable.

Tab. IX : Résultats pour CAD

Composantes	% du Débit	% de $U^2(Q)$
u^2_s	1,47	0%
u^2_{proj}	311,90	55%
$u^2(Vb)$	2,41E-07	0%
$u^2(V)$	3,06E-03	0%
$u^2(h)$	6,84E-04	0%
u^2_{extp}	248,62	44%
u^2_m	0,06	0%
Corrélation	1,46E-03	0%
$u_c'^2$	560	
$\sqrt{u_c'^2}$	23,7	
Résultats		
U' (k=2)	47	%
U (k=2)	5,41	m³/s
Q (ADCP)	11,4	m³/s

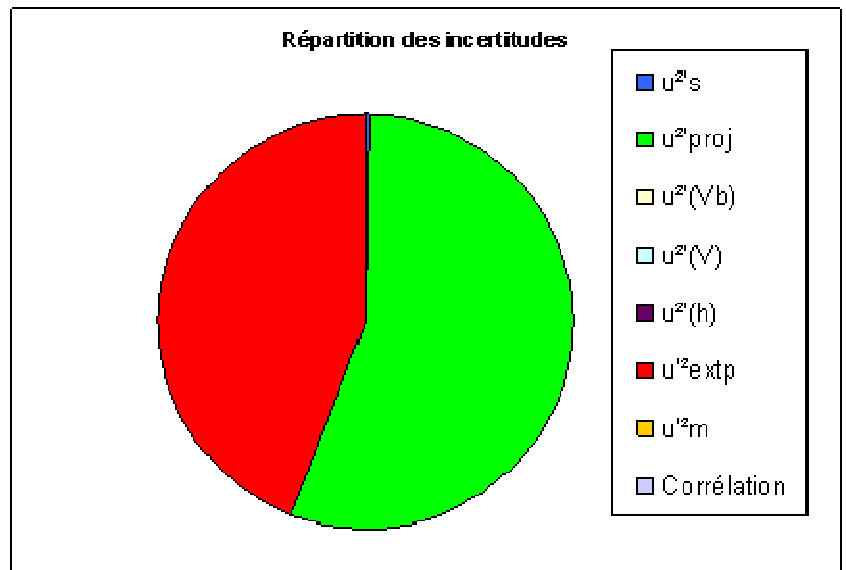


Fig. 18 : Répartition des composantes d'incertitudes pour le jaugeage CAD

5.1.6 L'exemple de Nant : NAN

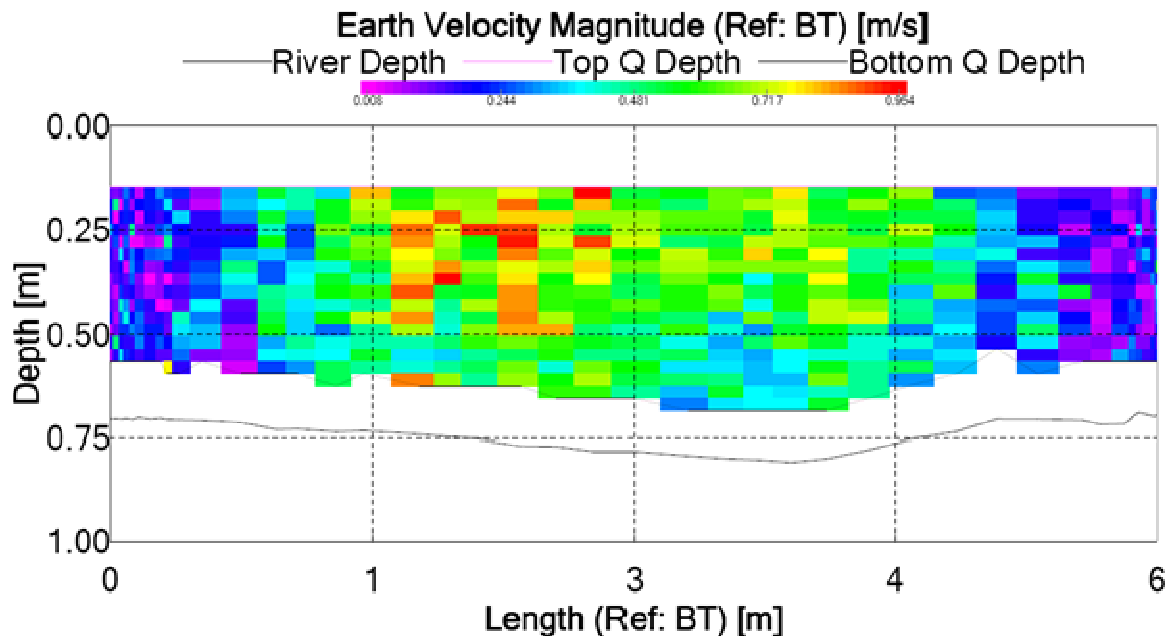


Fig. 19 : Profil de vitesses à Nant (12) sur le Durzon (Echelle de vitesses de 0 à 0,9m/s) ADCP StreamPro 2400 kHz (données Cemagref)

Ce jaugeage est réalisé sur un cours d'eau alimenté par une source karstique ce qui est très intéressant car cela assure une bonne stabilité du débit. Ce jaugeage réalisé pendant une formation à des agents de l'ONEMA a permis d'effectuer une comparaison de méthodes (Dramais, 2010) avec un capteur ADV (acoustic Doppler velocimeter) sur perche (Fig. 20) Le jaugeage ADV est constitué de 15 verticales placées le long du transect, 3 mesures de vitesses sont effectuées à 20, 40 et 80 % de la hauteur d'eau, soit 45 points de vitesse. La géométrie de la section est mesurée par la perche support du capteur et un décimètre tendu au dessus de la rivière.



Fig. 20 & 21: Déploiement d'un ADV Flowtracker sur perche et d'un ADCP SP2400 kHz sur le Durzon à Nant.

Le débit à l'ADCP (fig. 21) est issu de 6 transects qui ont une dispersion de 1 %, et on a 37 % de débit extrapolé pour ce jaugeage.

Deux calculs d'incertitude sont donc réalisés sur les deux jeux de données ; la norme ISO 748 est directement appliquée aux données ADV, la méthode développée pour l'ADCP mobile est aussi appliquée :

- $U'(Q_{ADV}) = 6,5 \% (k=2)$ pour un débit mesuré de $1,32 \text{ m}^3/\text{s}$. La composante qui contribue le plus à l'incertitude est u'_m à cause du faible nombre de verticales.

- $U' (Q_{ADCP}) = 5,4 \% (k=2)$ pour un débit mesuré de $1,37 \text{ m}^3/\text{s}$, la composante qui contribue le plus à l'incertitude est u'_{exp} .

Les jaugeages servent la plupart du temps à alimenter des courbes de tarage ou relations hauteur/débit. Comme il est assez aisé de mesurer la hauteur d'eau en continu dans un cours d'eau, ces courbes et les barèmes ou lois qui en sont issus permettent par la suite de transformer les enregistrements de hauteur d'eau en valeur de débit. Le site du Durzon à Nant est équipé d'une chaîne de mesure de hauteur d'eau et d'une échelle limnimétrique. Une courbe de tarage a été élaborée suite à des jaugeages sur site par le personnel du parc naturel régional des Grands Causses. La hauteur mesurée à l'échelle limnimétrique est de $0,31\text{m}$ pendant les jaugeages, le barème issu de la courbe de tarage du site nous donne un débit de $1,39 \text{ m}^3/\text{s}$ pour cette cote. On a un écart à la courbe de $5,2 \%$ pour le jaugeage Q_{ADV} et un écart à la courbe de $1,3 \%$ pour le jaugeage Q_{ADCP} .

On voit dans cet exemple que l'ordre de grandeur de l'incertitude élargie est assez proche pour le même débit mesuré, avec deux méthodes de jaugeage différentes et deux évaluations des incertitudes différentes. En affinant plus l'étude de ce cas qui est réalisé dans des conditions idéales, l'incertitude pourrait être encore améliorée.

Tab. X : Résultats pour NAN

Composantes	% du Débit	% de $U^2(Q)$
u^2_s	1,47	20%
u^2_{proj}	0,00	0%
$u^2(Vb)$	2,29E-04	0%
$u^2(V)$	2,69E-05	0%
$u^2(h)$	1,50E-03	0%
u^2_{extp}	5,55	75%
u^2_m	0,34	5%
Corrélation	3,91E-03	0%
u_c^2	7,4	
$\sqrt{u_c^2}$	2,7	
Résultats		
U' (k=2)	5,4	%
U (k=2)	0,07	m³/s
Q (ADCP)	1,37	m³/s

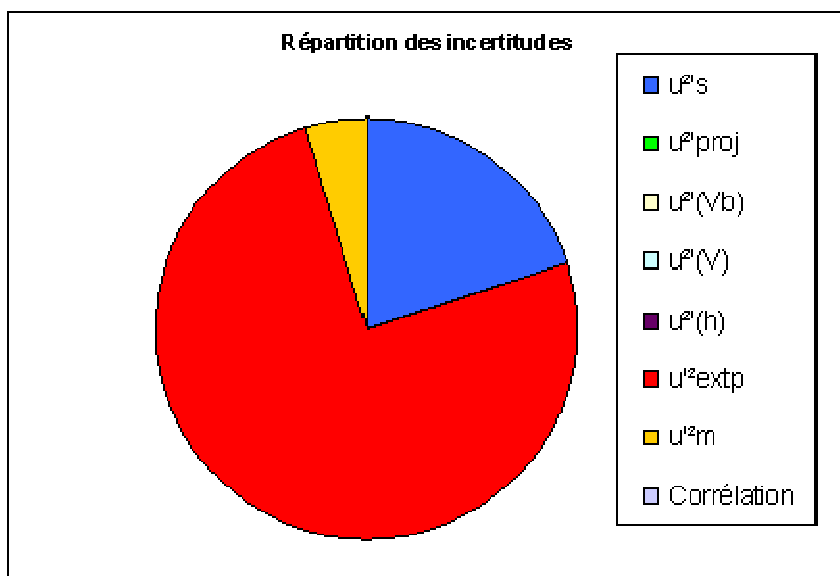


Fig. 22 : Répartition des composantes d'incertitudes pour le jaugeage NAN

5.1.7 L'exemple de Charbonnières les bains : CHA

Dans l'exemple présenté ci-dessous, un jaugeage a été réalisé avec un ADCP Streampro 2400 kHz sur un petit cours d'eau, le Charbonnières, en mars 2010. La figure 23 représente la courbe de tarage du cours d'eau le Charbonnières. Le point mesuré à l'ADCP est mis en évidence par un cercle rouge. Ce point sort de l'enveloppe de 10 % autour de la courbe, le débit est surestimé par rapport à la relation théorique. Cette courbe théorique est une courbe composée qui modélise un déversoir à double sensibilité. La station hydrométrique et son capteur de hauteur d'eau sont placés en amont d'un seuil épais en béton (à crête horizontale). Ce seuil est équipé d'un déversoir triangulaire en son centre, pour mesurer les faibles débits avec une bonne sensibilité.

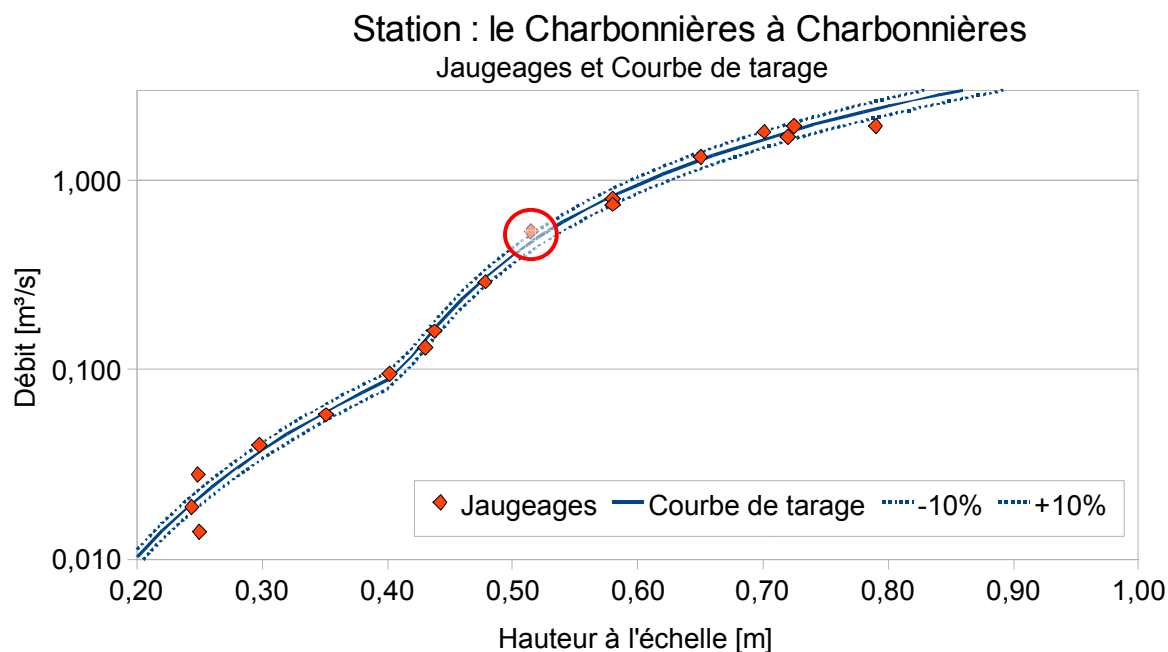


Fig. 23 : Courbe de tarage du Charbonnières à Charbonnières les bains.

Cette valeur de débit est issue d'une moyenne de 6 mesures ADCP. En étudiant les données plus en détail (Tableau XI), on remarque que la part de débit extrapolé en haut Q_{top} représente 40 % du débit total, la partie extrapolée en bas Q_{bot} représente 20 % du débit total.

Tab. XI : Proportion du débit extrapolé dans l'exemple du Charbonnières

Transect	Q Total m ³ /s	Q _{Top} m ³ /s	Q _{Mes} m ³ /s	Q _{Bot} m ³ /s	Q _{Left} m ³ /s	Q _{Right} m ³ /s	Débit en haut % de Q Total	Débit extrapolé % de Q Total
Station000	0.58	0.22	0.23	0.11	0.006	0.007	38.6	59.8
Station002	0.48	0.19	0.19	0.09	0.004	0.008	39.2	60.4
Station003	0.55	0.22	0.22	0.10	0.003	0.01	39.4	60.2
Station004	0.51	0.20	0.20	0.10	0.004	0.008	39.3	60.5
Station005	0.55	0.21	0.22	0.10	0.004	0.01	39.0	59.9
Station006	0.54	0.21	0.21	0.10	0.004	0.009	39.4	60.8
Moyenne	0.53	0.21	0.21	0.10	0.00	0.01	39.2	60.3
Ecart type	0.04	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.30	0.38
Ec. Type/Moy.	0.07	0.06	0.07	0.07	0.24	0.14	0.01	0.01

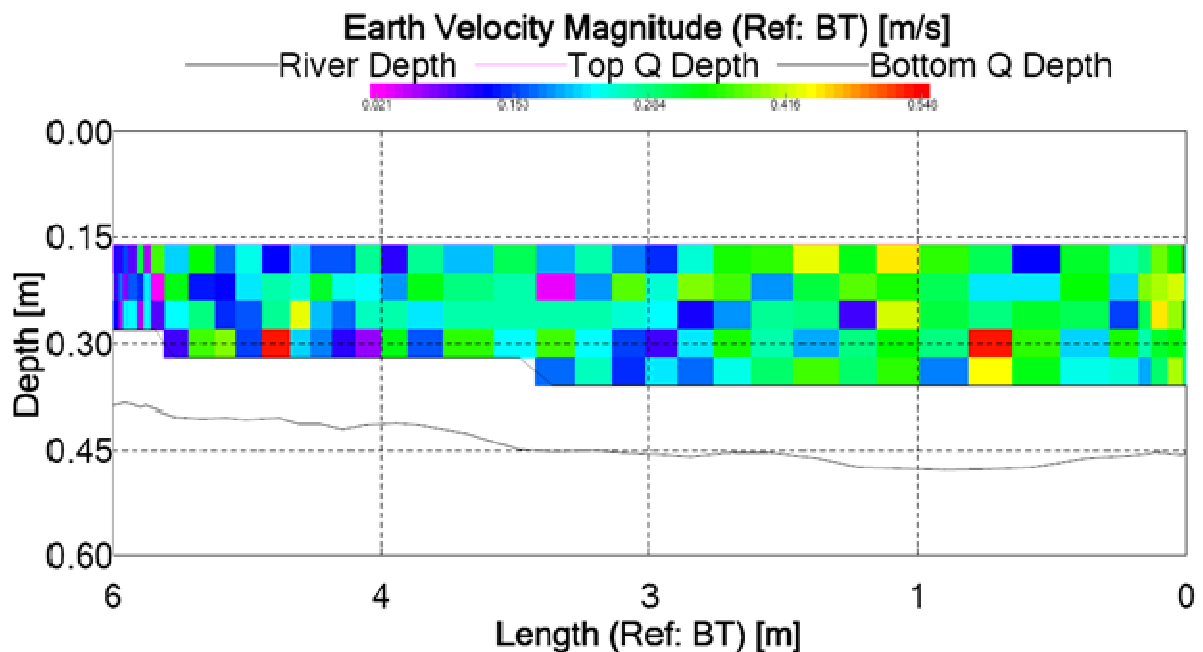


Fig. 24 : Profil de vitesses du Charbonnières à Charbonnières les bains (Echelle de vitesses de 0 à 0,6m/s) ADCP StreamPro 2400 kHz (données Cemagref)

Il y a deux explications de la surestimation de ce jaugeage, d'une part les hauteurs d'eau sont très faibles (<50 cm) ce qui rend la proportion des débits extrapolés importante par rapport à la partie mesurée, d'autre part ce jaugeage est réalisé quelques mètres à l'amont d'un seuil ce qui ralentit considérablement l'écoulement et modifie les profils de vitesses qui peuvent ne pas suivre les lois théoriques (Fig. 26).

L'incertitude élargie est de 11,2 % (k=2) pour ce jaugeage.

Voyons comment se comportent les différentes composantes d'incertitudes pour cet exemple :

- La partie extrapolée représente près de 61 % du débit total. Le débit total est de $0,55 \text{ m}^3$ avec une dispersion 4 %. Le terme u'_{exp} représente une très forte contribution à l'incertitude totale sur ce jaugeage.
- Les termes u'_{proj} et u'_m sont ici négligeables.

Tab. XII : Résultats pour CHA

Composantes	% du Débit	% de $U^2(Q)$
u^2_s	1,47	5%
u^2_{proj}	0,00	0%
$u^2(Vb)$	1,88E-04	0%
$u^2(V)$	4,22E-04	0%
$u^2(h)$	5,95E-03	0%
u^2_{extp}	29,33	94%
u^2_m	0,46	1%
Corrélation	3,81E-03	0%
$u_c'^2$	31	
$\sqrt{u_c'^2}$	5,6	
Résultats		
$U' (k=2)$	11	%
$U (k=2)$	0,06	m^3/s
$Q (ADCP)$	0,55	m^3/s

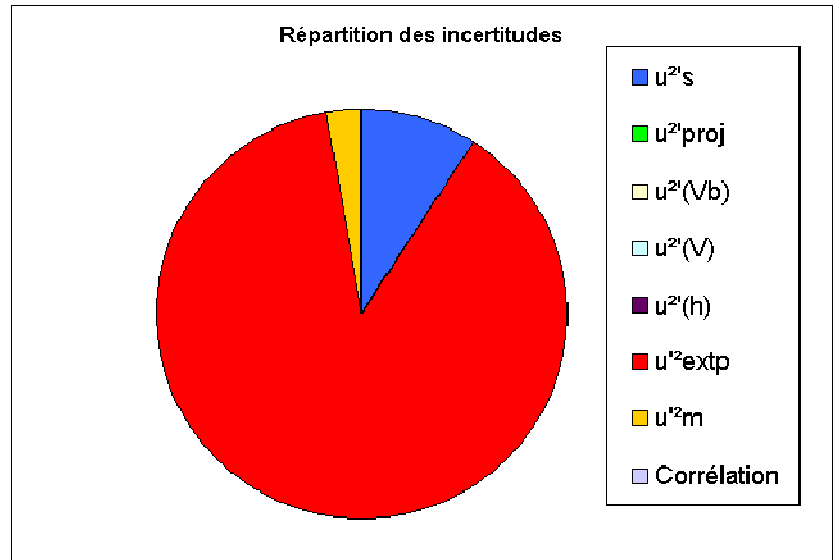


Fig. 25 : Répartition des composantes d'incertitudes pour le jaugeage CHA

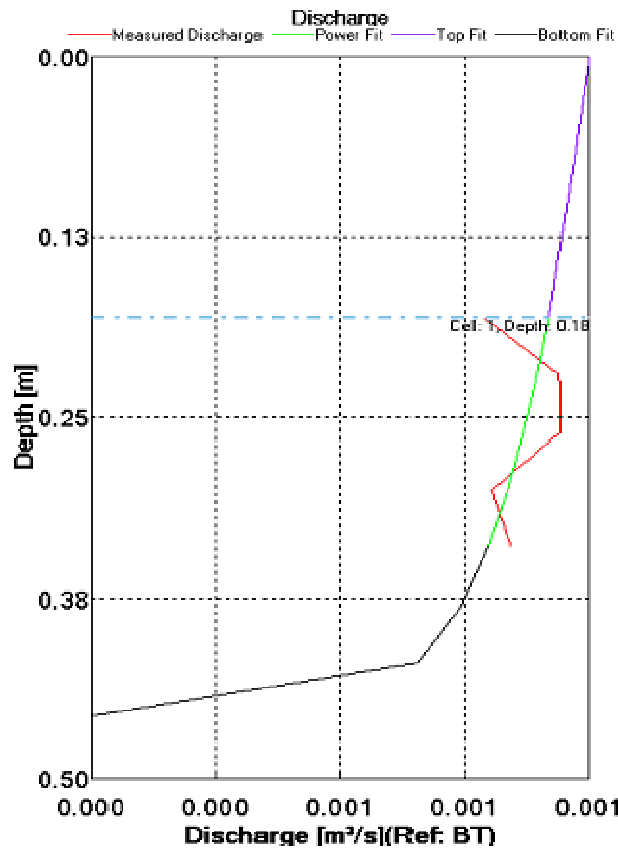


Fig. 26 : Profil vertical de débit représentatif de l'exemple CHA

L'écart à la courbe de la valeur de débit s'explique donc par la partie extrapolée du débit mesuré par l'ADCP, la loi puissance choisie dans ce cas là est sans doute mal adaptée aux conditions d'écoulement en amont du seuil de Charbonnières. En effet on remarque sur le profil moyenné (30 ensembles) de la figure 26, que la partie mesuré (courbe rouge) a tendance à diminuer à l'approche de la surface. Elle ne suit donc pas la loi puissance théorique (courbe violette).

Cet exemple est intéressant à comparer avec l'exemple NAN : dans les deux cas nous sommes en présence de petites sections. Dans le cas de NAN l'incertitude élargie est meilleure malgré une extrapolation de près de 37%, le terme u'_{extp} est dominant mais prend des proportions moindres que dans le cas de l'exemple CHA.

5.2 Conclusion sur les résultats

Les exemples traités jusqu'alors permettent de vérifier que la méthode développée est assez robuste et qu'elle ne favorise pas ou ne pénalise pas un jaugeage plutôt qu'un autre. Les autres exemples du tableau V sont rapidement décrits en annexe 2, ils permettent de confirmer que pour des conditions d'écoulement variées, la méthode donne des résultats d'incertitude réalistes. On se rend compte que la dispersion de 6 mesures de débit ADCP n'est pas suffisante pour attester de la qualité d'un jaugeage par ADCP mobile. La part des débits extrapolés peut être importante et l'erreur due à l'extrapolation n'est pas réduite par la moyenne (erreur systématique). Cette méthode doit encore être testée et on pourra sans doute affiner l'étude des différentes composantes de l'incertitude.

5.3 Perspectives sur l'évaluation des différents termes

5.3.1 u'_m : Composante sur le nombre de verticales

Au début de ce travail nous pensions arriver à établir des critères de moyennage des ensembles pour réduire le nombre de verticales et se rapprocher un peu plus du calcul type ISO 748. Les pistes suivies sont autant de perspectives.

Pour réduire le nombre d'ensembles dans l'optique de décorrélérer les mesures de vitesse de l'eau on pose les critères suivants :

- Dans le cas des cours d'eau de largeur supérieure à 5m, ce qui est le cas pour la quasi-totalité des rivières jaugées par ADCP, la norme ISO 748 exige que le débit qui passe dans chaque élément de section (séparé par deux verticales) soit dans la mesure du possible inférieur à 5 % et ne dépasse en aucun cas 10 % du débit total. Une première moyenne peut ainsi être réalisée en répartissant des verticales à chaque pas de 5 % de la largeur totale. Le débit qui transite alors dans chaque élément de section répondra a priori à l'exigence de la norme.
- Les verticales doivent également être choisies pour bien décrire la géométrie des zones de l'écoulement où les profondeurs varient beaucoup (les bords et ruptures de pentes). Le critère proposé permet de moyennner davantage quand la profondeur est régulière et de moyennner moins sur les bords :

$$\text{Si } \Delta h \leq 20\% h_{\max} \quad (25)$$

avec Δh la différence de profondeur de l'ensemble *considéré* et h_{\max} la profondeur maximale rencontrée dans le transect.

Alors deux verticales successives peuvent être moyennées.

- Les verticales doivent être choisies pour bien décrire l'écoulement et ses variations dans la section. Il est important de décrire les zones où la vitesse change dans la section. Le critère sur la vitesse doit permettre de moyennner un certain nombre de verticales où :

$$\text{Si } \Delta v_i \leq 20\% v_{\max} \quad (26)$$

avec Δv_i la différence de vitesse entre deux cellules de vitesses adjacentes et v_{\max} la vitesse maximale dans verticale considérée.

Alors deux verticales successives peuvent être moyennées.

En suivant ces trois étapes chronologiquement, la description des bords reste plus fine que celle des parties plus profondes et régulières de la section. Ce découpage permet de réduire le nombre de verticales tout en gardant un nombre suffisant pour ne pas être pénalisé par le terme u_m .

Une autre approche pourrait être de prendre en compte la bathymétrie du cours d'eau et la configuration des faisceaux (écartement de 20°) pour déterminer par calcul géométrique le nombre et la répartition des sous sections, de façon à éviter le recouvrement des faisceaux.

5.3.2 u'_{proj} : Composante sur les projections

La figure 27 illustre les trajectoires variables que l'on peut observer pour la mesure d'une même section (la trajectoire de l'ADCP est en rouge, les vecteurs bleu sont les vecteurs vitesses). Dans ces trois cas la section explorée n'est pas exactement la même. Peut-être que certains transects peuvent être éliminés d'une série en prenant en compte des critères de trajectoire qui amènent sans doute une incertitude supplémentaire.

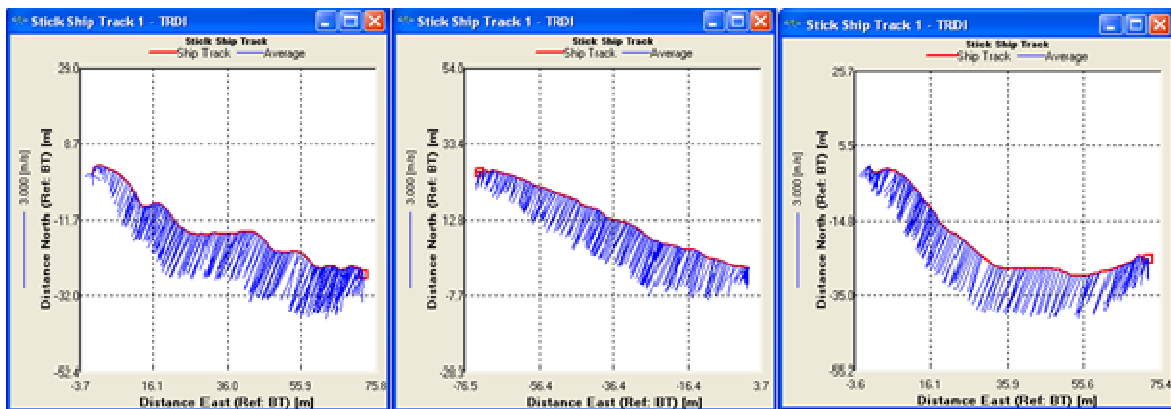


Fig 27 : Trajectoires différentes d'un ADCP à Pylimont (Rhône)

5.3.3 Tangage, roulis et enfoncement du capteur

Le tangage et le roulis peuvent avoir une influence sur les débits mesurés et extrapolés et la mesure de profondeur. L'enfoncement du capteur va varier en fonction du support de flottaison utilisé (bateau avec potence à la proue ou sur le côté, support léger avec drisse) et de la vitesse de l'écoulement. En cas de vitesses fortes, le support va avoir une réaction et modifier l'inclinaison et l'enfoncement du capteur. L'incertitude sur le débit extrapolé peut être pondérée par une

analyse de la variation du tangage et du roulis pendant le jaugeage. On peut aussi quantifier expérimentalement l'erreur causée par le tangage et le roulis sur la mesure de hauteur d'eau.

5.3.4 $u'(V_b)$: Composante sur la vitesse de l'ADCP

Dans la méthode proposée, nous utilisons une loi empirique pour évaluer l'incertitude sur la vitesse de déplacement de l'ADCP. Cette incertitude pourrait être évaluée également en comparant des vitesses de déplacement obtenues par le suivi de fond de l'ADCP et des vitesses calculées à partir des coordonnées du DGPS lors des couplages ADCP/DGPS. Si on étend ces tests à des configurations de rivière différentes, on peut arriver à une évaluation expérimentale de ce terme $u'(V_b)$.

5.4.5 La vitesse de l'eau dans la zone aveugle

L'incertitude sur la vitesse extrapolée en haut peut aussi être évaluée par des mesures comparatives au courantomètre mécanique ou électromagnétique. En plaçant le moulinet à proximité de la surface, régulièrement le long d'un transect on peut comparer la vitesse réellement mesurée dans la zone aveugle avec la vitesse obtenue par la loi d'extrapolation. Cette opération peut être répétée dans des configurations d'écoulement variables.

5.4.6 La température

La température de l'eau (comme la salinité et la pression) va avoir un impact sur la vitesse du son dans l'eau. En acoustique sous-marine, les variations de pression et la stratification de la température et de la salinité vont modifier la célérité du son. En rivière, les profondeurs rencontrées sont assez faibles, la salinité et la température sont souvent homogènes dans la section sauf dans certains cas particuliers (rejets chauds, confluences, estuaires, masses d'eau stagnantes). Les variations de température sont prises en compte dans les algorithmes de calculs des ADCP, la température est mesurée en surface par le capteur mais la stratification de la température n'est pas prise en compte. La vitesse du son va avoir un impact sur les mesures de vitesse et de profondeur.

On doit, sur le terrain, contrôler que le capteur de température mesure correctement, par exemple par comparaison à un autre capteur, si aucune dérive n'est décelée l'incertitude sur la température peut être négligée.

5.4.7 La durée de mesure

La durée d'acquisition joue un rôle dans la qualité des données comme vérifié par Oberg (2007).

Et indirectement le ratio $\frac{\text{vitesse bateau}}{\text{vitesse eau}}$ décrit en 4.2.4, est un critère de qualité du jaugeage dépendant du temps. Ce critère est à étudier plus finement pour évaluer son influence réelle sur le jaugeage.

5.4.8 Les parties invalidées

Elles sont à prendre en compte suivant des règles à définir. A partir de quel pourcentage de données invalidées faut-il pénaliser le jaugeage ? Les ensembles perdus entièrement ont sans doute plus d'impact sur la mesure de débit et son incertitude que la perte de quelques cellules de vitesses. Si l'écoulement est homogène dans la section, les cellules et ensembles perdus sont extrapolés correctement, dans les cas où l'écoulement est moins homogène, l'erreur peut être plus importante. Un critère à vérifier est la distance parcourue par l'ADCP, elle est un signe de la qualité de la traversée et de sa représentativité.

6 Conclusion

« Le problème de la mesure des débits constitue l'une des plus pénibles incertitudes scientifiques actuelles » (Barbillon, 1909), cité dans Aldegheri (1979). Un siècle plus tard, les instruments de mesure du débit ont évolué et l'ADCP est le capteur le plus novateur en hydrométrie. Il permet d'effectuer des mesures de qualité, rapidement. Les équipes de terrain et les scientifiques s'accordent pour dire que les mesures sont fiables mais l'évaluation des incertitudes pose encore des problèmes.

La démarche exposée ici a montré qu'une approche de l'évaluation des incertitudes d'un jaugeage ADCP mobile était possible en combinant la norme ISO 748 avec le GUM. La méthode simplifiée proposée a permis de quantifier les incertitudes d'un échantillon de jaugeages variés. L'application de la méthode permet d'obtenir des incertitudes élargies qui se situent entre moins de 4 % et près de 50 % (avec $k=2$) pour l'échantillon considéré. La méthode est robuste sur l'échantillon testé.

Des pistes d'améliorations sont envisagées pour affiner l'étude des différents termes du calcul. On peut se rapprocher un peu plus du cadre de la norme ISO 748 en arrivant par exemple à moyenner assez d'ensembles pour obtenir des éléments de sections dans lesquelles les vitesses ne seraient plus corrélées entre elles.

Au niveau opérationnel, ce travail a permis de rappeler que la dispersion de 6 transects ADCP n'était pas suffisante pour attester de la qualité d'un jaugeage par ADCP mobile. Cette étude montre qu'il est important d'arriver à mieux extrapoler les parties non mesurées. Ceci peut être réalisé en faisant des mesures complémentaires ou en arrivant à obtenir des critères d'extrapolation en étudiant la partie mesurée de l'écoulement et/ou les caractéristiques physiques de la section et du tronçon étudié. L'étude des projections géométriques des vitesses est aussi à poursuivre, surtout en cas d'écoulements lents. Le fait de moyenner les pings en mode 1 à l'acquisition est peut-être une habitude qu'il faut remettre en cause, en effet ce paramétrage fait perdre des données brutes alors qu'en post-traitement, il est intéressant d'avoir le profil le plus complet possible. Enfin, la connaissance des incertitudes sur le déplacement de l'instrument peut être améliorée en généralisant la géolocalisation centimétrique des jaugeages.

Il paraît indispensable de poursuivre les travaux d'intercomparaisons comme cela est fait dans les laboratoires d'étalonnage ou d'essai car cela permet d'améliorer les protocoles de déploiement et le suivi métrologique des instruments.

Table des annexes

ANNEXE 1 : Détail du calcul de $u^2(Q_{ADCP})$

ANNEXE 2 : Exemples de jaugeages et évaluation de l'incertitude associée

ANNEXE 3 : Protocole d'utilisation de la feuille de calcul Uadcpxls

ANNEXE 1

Détail du calcul de $u'^2(Q_{ADCP})$

Détail du calcul de $u^2(Q_{ADCP})$

Soit l'expression du débit par ADCP mobile : $Q_{ADCP} = \sum_{i=1}^m (Q_i^{mes} + Q_i^{top} + Q_i^{bot}) + Q_{right} + Q_{left}$

On sépare le débit mesuré Q_{mes} des débits extrapolés Q_{extp} dont les incertitudes seront évaluées expérimentalement :

$$Q_{ADCP} = Q_{mes} + Q_{extp}$$

$$u^2(Q_{ADCP}) = u^2(Q_{mes}) + u^2(Q_{extp})$$

On a

$$Q_{mes} = \sum_{i=1}^m B_i q_i$$

avec B_i la distance parcourue par l'ADCP à chaque mesure d'ensemble i ;

et q_i le débit unitaire d'un ensemble i (produit de la hauteur d'eau par la vitesse mesurée).

$$u^2(Q_{mes}) = \sum_{i=1}^m u^2(B_i q_i) = \sum_{i=1}^m (B_i q_i)^2 u^2(B_i q_i) = \sum_{i=1}^m (B_i q_i)^2 [u^2(B_i) + u^2(q_i)] \text{ car les mesures de } B_i \text{ et } q_i \text{ sont indépendantes}$$

On a pour un ensemble i , et pour k cellules :

$$Q_i^{mes} = B_i q_i \quad \text{on pose d'après la formule (5) du débit à travers une cellule : } Q_i^{mes} = \sum_{k=1}^{n_{bin}} V_{i,k} V_b \sin(\alpha_{i,k} - \beta) D_z D_t$$

avec :

$V_{i,k}$: vitesse de l'eau mesurée dans la cellule k ;

V_b : vitesse du bateau pour l'ensemble considéré ;

D_z : hauteur de la cellule ;

D_t : temps entre l'ensemble considéré et le dernier ensemble validé;

α_i : direction de l'écoulement dans la cellule;

β : direction de la vitesse du bateau.

On ressort V_b et D_t de la somme car ils sont indépendants du nombre de cellules

$$Q_i^{mes} = \underbrace{V_b D_t}_{B_i} \times \underbrace{\left[\sum_{k=1}^{n_{bin}} V_{i,k} \sin(\alpha_{i,k} - \beta) \right]}_{q_i} D_z$$

On cherche à obtenir les incertitudes sur $u^2(B_i)$ et $u^2(q_i)$, on pose deux hypothèses :

- On suppose l'incertitude sur le temps D_t négligeable donc il reste $u^2(B_i) = u^2(V_{b,i})$;
- On assimile l'incertitude sur la distance D_z à une incertitude sur la mesure de profondeur notée $u^2(h)$.

On cherche maintenant à exprimer $u^2(q_i)$. Le problème est que les vitesses sont corrélées entre elles du fait du recouvrement des faisceaux pendant la mesure. Pour déterminer la variance composée on applique à notre cas la loi de propagation des incertitudes appliquée aux valeurs corrélées (Equation 13 du GUM). On dérive en fonction des variables $V_{i,k}$ et $\alpha_{i,k} - \beta$. Pour mener au bout ce calcul il est nécessaire de faire 3 hypothèses simplificatrices.

- L'incertitude sur chaque vitesse pour toutes les cellules est considérée comme étant du même ordre de grandeur : $u(V_{i,k}) \approx u(V_i)$;
- L'incertitude sur chaque couple $(\alpha_i - \beta)$ pour toutes les cellules est considérée comme étant du même ordre de grandeur : $u(\alpha_{i,k} - \beta) \approx u(\alpha_i - \beta)$;
- Pour toutes les cellules, les vitesses $V_{i,k}$ sont proches de leur moyenne V_i , les couples $(\alpha_{i,k} - \beta)$ sont proches de leur moyenne $(\alpha_{i,k} - \beta)$.

On obtient un développement intermédiaire assez long de $u^2(q_i)$ que l'on simplifie en le passant en relatif soit :

$$u'^2(q_i) = \frac{u^2 \left(\sum_{k=1}^{n_{bin}} V_{i,k} \sin(\alpha_{i,k} - \beta) \right)}{\left[n_{bin} V_i \sin(\alpha_i - \beta) \right]^2}$$

Il vient :

$$u'^2(q_i) = \frac{1}{n_{bin}} \left[u'^2(V_i) + u'^2(V_i) r(V_i, V_i')(n_{bin} - 1) + \frac{1}{\tan^2(\alpha_i - \beta)} u'^2(\alpha_i - \beta) \right]$$

avec $r(V_i, V_i') = \frac{u(V_i V_i')}{u(V_i) u(V_i')}$ le coefficient de corrélation pris à 0,4 (Muste 2009)

On revient à l'expression de l'incertitude sur le débit mesuré :

$$u^2(Q_{mes}) = \sum_{i=1}^m (B_i q_i)^2 \left\{ u'^2(V_{b,i}) + \frac{1}{n_{bin}} \left[u'^2(V_i) + u'^2(V_i) r(V_i, V_i')(n_{bin} - 1) + \frac{1}{\tan^2(\alpha_i - \beta)} u'^2(\alpha_i - \beta) + u'^2(D_z) \right] \right\}$$

Terme de corrélation

Terme de projection des vitesses u'_{proj}
(indépendant du nombre de cellules)

Terme assimilé à l'incertitude
sur la mesure de profondeur

On introduit u'_s composante systématique liée à l'étalonnage des différents capteurs de l'ADCP, et u'_m l'incertitude sur le nombre d'ensembles ou verticales, et u'_{exp} l'incertitude systématique sur les débits extrapolés. L'expression $u'^2(Q_{ADCP})$ devient alors :

$$u'^2(Q_{ADCP}) = u'^2_m + u'^2_s + u'^2_{proj} + \frac{\left\{ \sum_{i=1}^m (B_i q_i) \right\}^2 \left\{ u'^2(V_{b,i}) + \frac{1}{n_{bin}} \left[u'^2(V_i) + u'^2(V_i) r(V_i V_i') (n_{bin} - 1) + u'^2(h) \right] \right\}}{Q^2(ADCP)} + u'^2_{exp}$$

D'après les hypothèses formulées dans la norme ISO 748 (2009) et Herschy (2002), les verticales de mesure sont positionnées de telle sorte que les débits des éléments de section $B_i q_i$ soient approximativement égaux et si les incertitudes composantes sont identiques d'une verticale à l'autre. Alors l'équation peut être simplifiée comme suit :

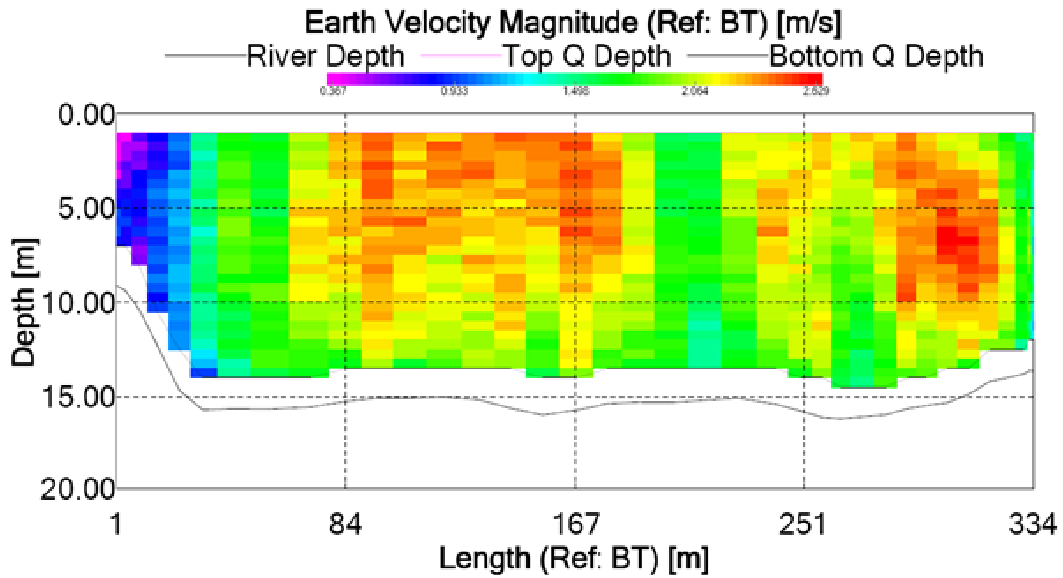
$$u'^2(Q_{ADCP}) = u'^2_m + u'^2_s + u'^2_{exp} + u'^2_{proj} + \frac{1}{n_{ens}} \left\{ u'^2(V_b) + \frac{1}{n_{bin}} \left[u'^2(V_i) + u'^2(V_i) r(V_i V_i') (n_{bin} - 1) + u'^2(h) \right] \right\}$$

ANNEXE 2

Exemples de jaugeages et évaluation de l'incertitude associée

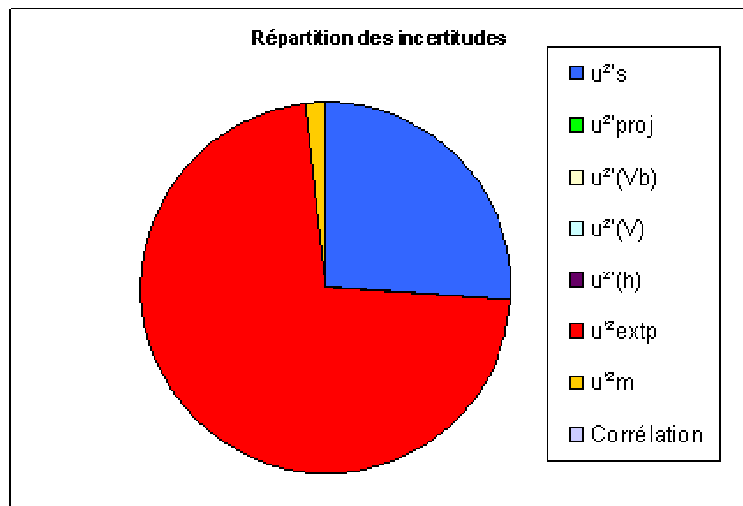
Beucaire sur le Rhône (données CNR de la crue du 04/12/2003) ADCP Broad Band 600 kHz

Jaugeage à Beaucaire pendant la plus grosse crue du Rhône de ces dernières années, le jaugeage pris en exemple ici n'est pas le maximum de la crue. Les six transects ont une dispersion de 6 %.



Profil de vitesse à Beaucaire (Echelle de vitesse de 0 à 2,6m/s)

Composant es	% du Débit	% de $U'^2(Q)$
u'^2_s	1,47	26%
u'^2_{proj}	0,00	0%
$u'^2(Vb)$	2,91E-07	0%
$u'^2(V)$	2,06E-07	0%
$u'^2(h)$	3,97E-04	0%
u'^2_{extp}	4,09	72%
u'^2_m	0,09	2%
Corrélation	1,96E-03	0%
$u_c'^2$	5,66	
$\sqrt{u_c'^2}$	2,38	
Résultats		
U' (k=2)	4,8	%
U (k=2)	430	m^3/s
Q (ADCP)	9030	m^3/s

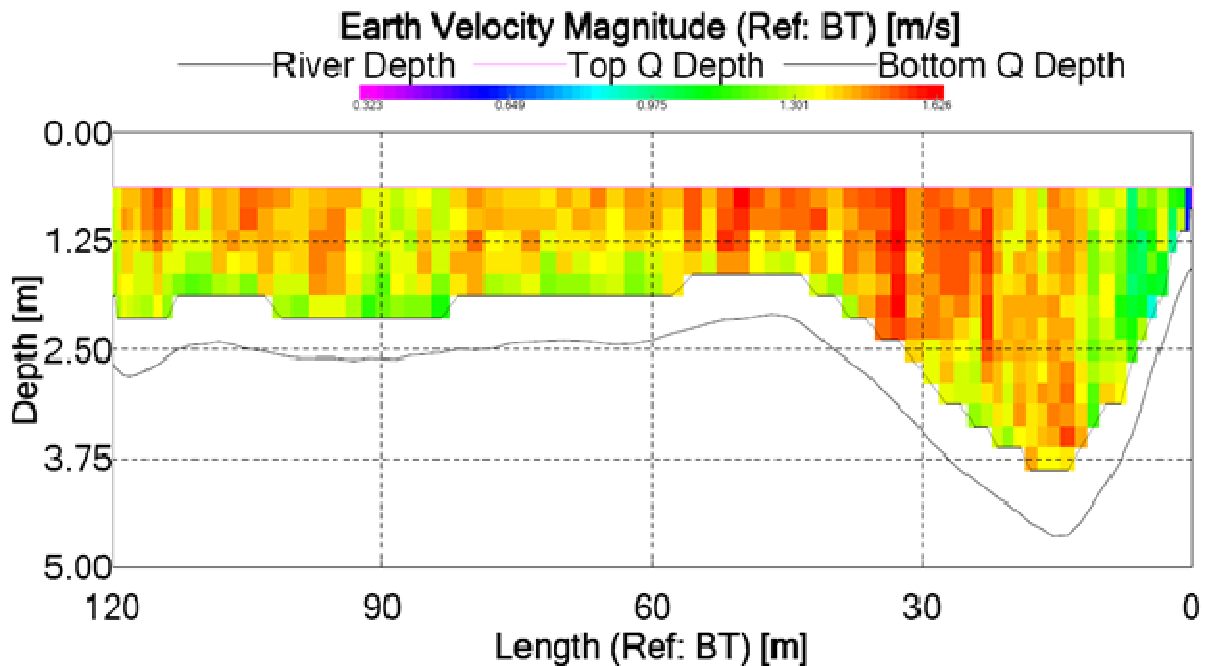


Répartition des incertitudes pour le jaugeage à Beaucaire

La contribution principale est pour la partie extrapolée u'_{extp} pour un débit extrapolé de 16 % soit le plus faible de tous les exemples traités.

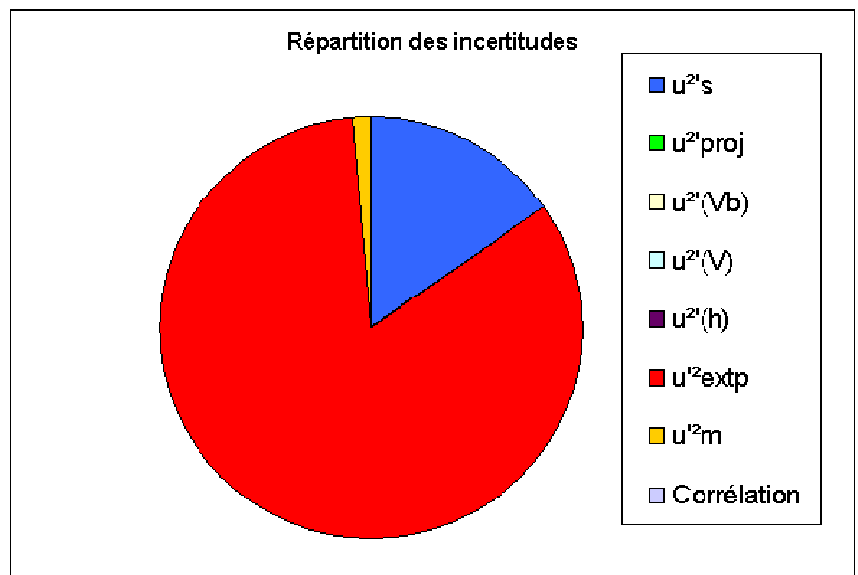
Jons sur le Rhône (données Cemagref du 20/12/2010) ADCP Rio Grande 1200kHz

Profil de rivière et d'écoulement un peu particulier situé à une diffluence en amont d'une retenue. Les vitesses sont assez fortes (1,3-1,6 m/s) et très homogènes dans la section. Les six transects ont une dispersion de 1 %.



Profil de vitesse à Jons (Echelle de vitesse de 0 à 1,6m/s)

Composantes	% du Débit	% de $U^2(Q)$
u^2_s	1,47	15%
u^2_{proj}	0,00	0%
$u^2(Vb)$	4,49E-07	0%
$u^2(V)$	4,30E-06	0%
$u^2(h)$	2,07E-03	0%
u^2_{extp}	8,01	83%
u^2_m	0,14	1%
Corrélation	2,15E-03	0%
$u_{(c)}^2$	9,62	
$\sqrt{u_{(c)}^2}$	3,10	
Résultats		
$U' (k=2)$	6,2	%
$U (k=2)$	28,1	m^3/s
$Q (ADCP)$	453	m^3/s



Répartition des incertitudes pour le jaugeage à Jons

La contribution principale est pour la partie extrapolée u'_{extp} pour un débit extrapolé de 43 %.

Pyrimont sur le Rhône intercomparaison (profil S1_PY16) du 13/10/2010

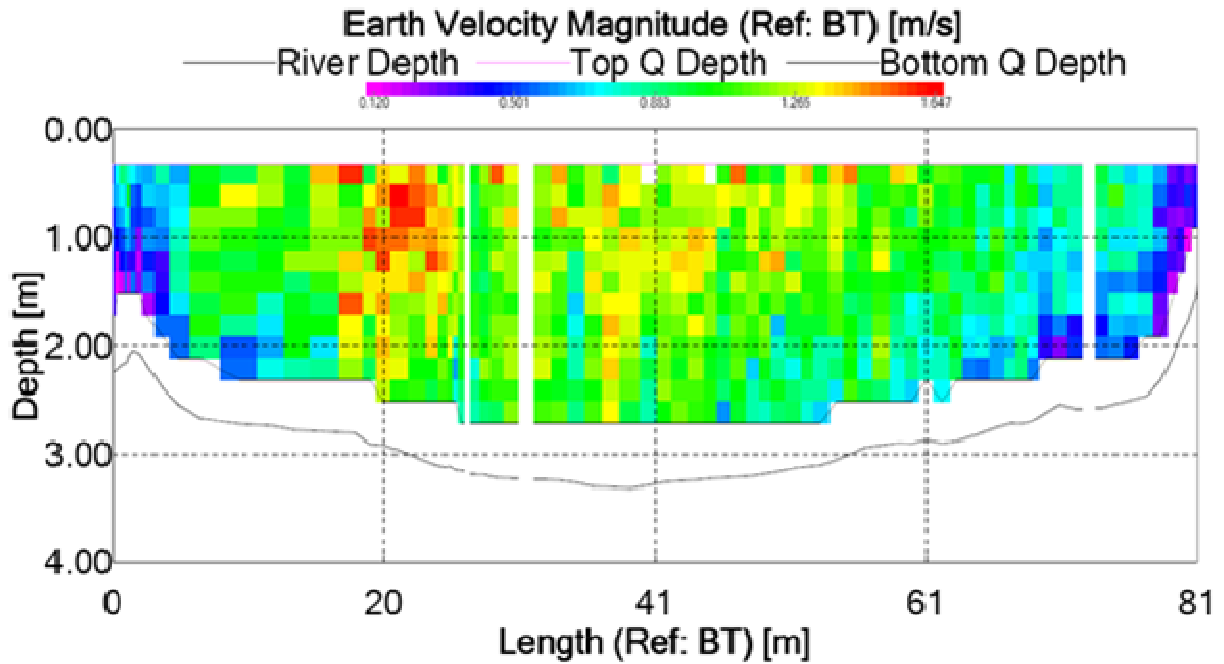
ADCP Rio Grande 1200kHz (données Groupe Doppler)

Durant cette étude, un test intercomparaison inédit a été organisé pour confronter des ADCP de différents services les uns aux autres. 26 ADCP répartis sur 13 embarcations ont été déployés en aval du barrage usine de la CNR à Génissiat (01) sur deux tronçons offrant des conditions d'écoulement différents. Durant trois jours, le programme de débit a permis de mesurer 5 paliers différents. Chaque équipe a mesuré en continu le débit pendant ces paliers. 4000 transects ont été enregistrés et feront l'objet d'une étude approfondie et de publications scientifiques.

L'élaboration du protocole et la logistique du test a fait l'objet d'une collaboration entre la CNR et le Cemagref.

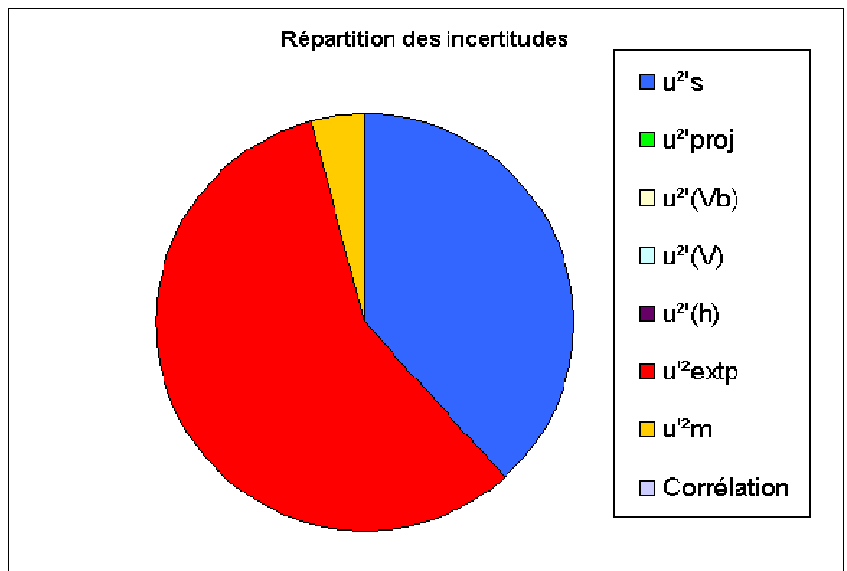
Les écarts des débits moyens ADCP entre eux étaient généralement de l'ordre de 1 % à 3 %, avec des écarts systématiques de 5 % à 6 % pour certaines sections ou appareils particuliers. Avec un écoulement stable, une vingtaine de minutes (soit 4 à 10 traversées) permet d'obtenir une convergence des débits à moins de 2 % de la moyenne du groupe d'ADCP. Les écarts plus importants observés avec le débit de référence (4 % à 9 %) proviennent probablement d'un défaut de paramétrage sur certaines conduites. Après correction des paramétrages des conduites et une analyse basée sur les normes ISO 5725-2, ISO 13528 et le fascicule FD ISO 21748, les incertitudes sur la méthode ADCP sont évaluées à moins de 3 % ($k=2$) et les écarts à la valeur de référence (débit des groupes ou débit de référence issus de l'analyse robuste) vont de 0,60 à 3,28 % suivant les différences de palier considérées (analyse réalisée par B. Blanquart LNE pour la CNR).

Le tronçon de Pyrimont offre des sections idéales pour des jaugeages, il est rectiligne, l'écoulement est bien réparti. Les six transects sélectionnés dans cet exemple ont une dispersion de 1%.



Profil de vitesse à Pyrimont (Echelle de vitesse de 0 à 1,6m/s)

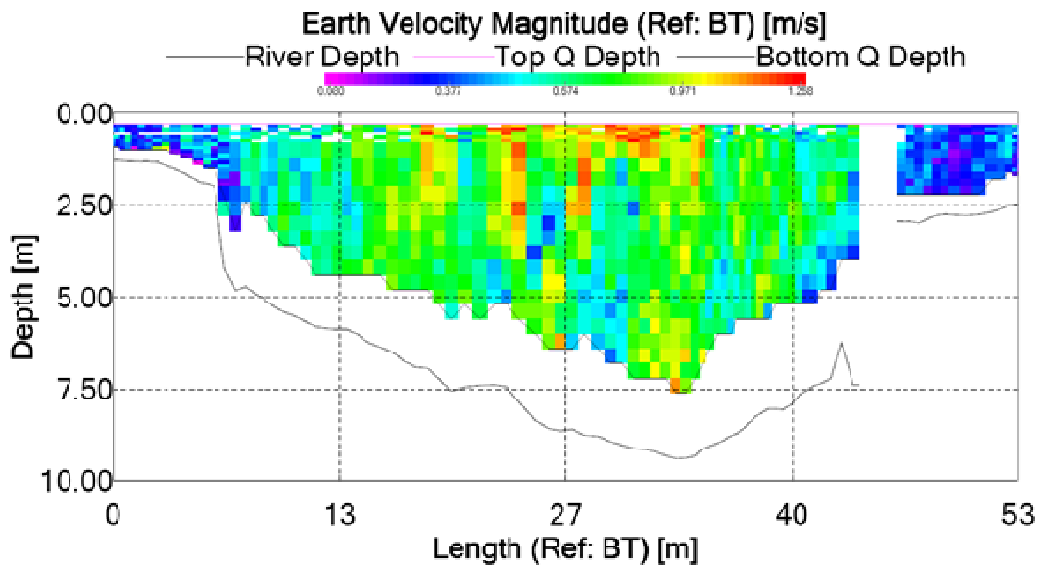
Composante s	% du Débit	% de $U'^2(Q)$
u'^2_s	1,47	38%
u'^2_{proj}	0,00	0%
$u'^2(Vb)$	1,11E-06	0%
$u'^2(V)$	8,87E-06	0%
$u'^2(h)$	1,69E-03	0%
u'^2_{extp}	2,21	58%
u'^2_m	0,16	4%
Corrélation	2,36E-03	0%
$u_{(c)}'^2$	3,84	
$\sqrt{u_{(c)}'^2}$	1,96	
Résultats		
$U' (k=2)$	3,9	%
$U (k=2)$	8,49	m^3/s
$Q (ADCP)$	217	m^3/s



La contribution principale est encore pour la partie extrapolée u'_{extp} pour un débit extrapolé de 26 %.

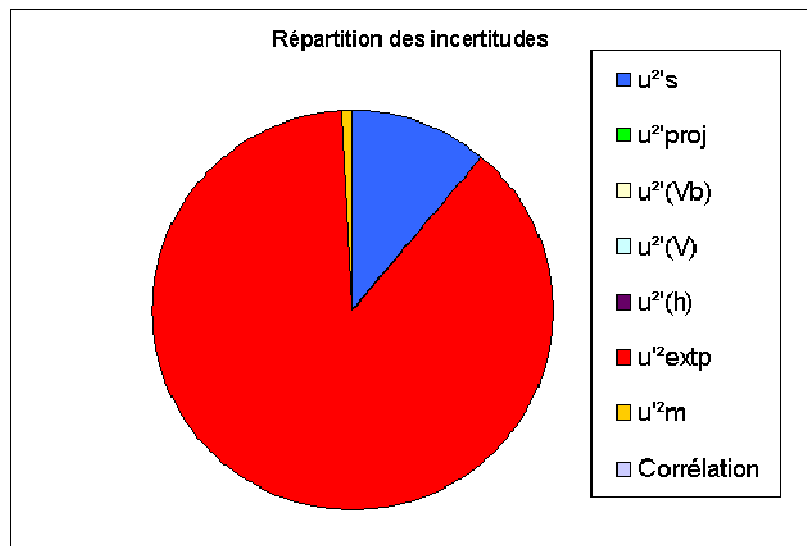
Génissiat sur le Rhône intercomparaison (profil S1_P3) du 13/10/2010 ADCP Broad Band 600kHz (données Groupe Doppler)

Profil le plus problématique du test intercomparaison d'octobre, ce profil se situe en aval direct du barrage, la section est profonde avec des ruptures de pente importantes. La dispersion est de 8 % sur les six transects. Ce profil a posé des problèmes pendant le test malgré les adaptations (changement d'appareil, de paramétrage, de vitesse de déplacement...).



Profil de vitesse à Genissiat (Echelle de vitesse de 0 à 1,3m/s)

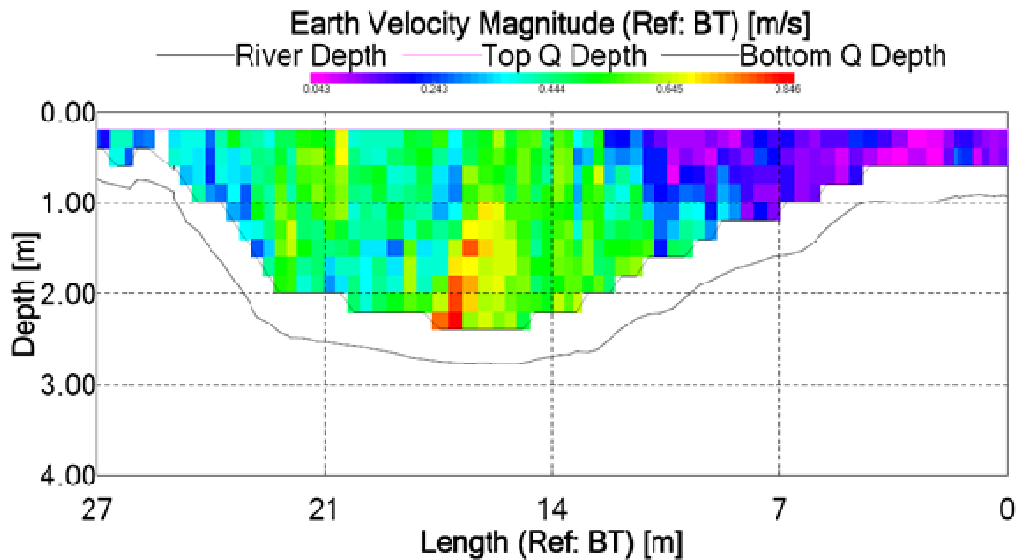
Composante s	% du Débit	% de $U'^2(Q)$
u'^2_s	1,47	11%
u'^2_{proj}	0,00	0%
$u'^2(Vb)$	1,36E-06	0%
$u'^2(V)$	9,49E-06	0%
$u'^2(h)$	8,98E-04	0%
u'^2_{extp}	11,61	88%
u'^2_m	0,10	1%
Corrélation	1,90E-03	0%
$u_{(c)}'^2$	13,2	
$\sqrt{u_{(c)}'^2}$	3,63	
Résultats		
U' (k=2)	7,3	%
U (k=2)	15,2	m^3/s
Q (ADCP)	209	m^3/s



La contribution principale est encore pour la partie extrapolée u'_{extp} pour un débit extrapolé de 32 %. L'incertitude élargie est plus importante pour ce jaugeage que pour le précédent ce qui rassure sur la qualité de la méthode.

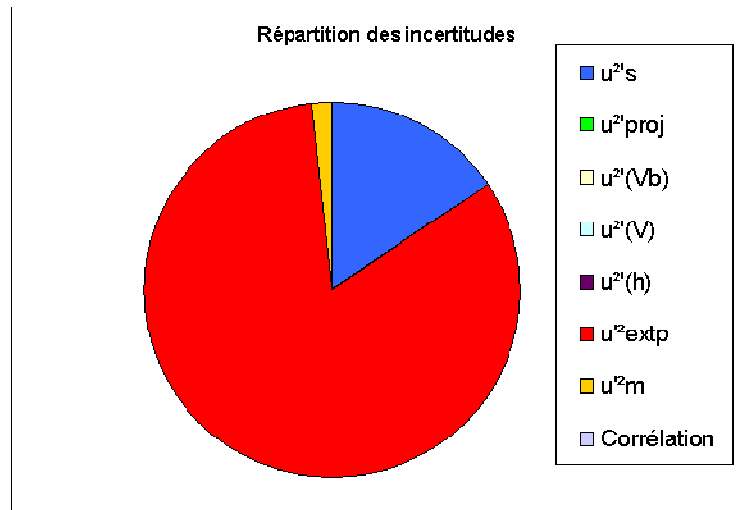
Varambon sur le Suran (données CNR du 25/11/2009) ADCP StreamPro 2400kHz

Profil sur un affluent rive droite de l'Ain. On remarque sur le profil de vitesse que l'écoulement n'est pas très homogène dans la section. La dispersion est de 3 % sur les six transects.



Profil de vitesse à Varambon (Echelle de vitesse de 0 à 0,8m/s)

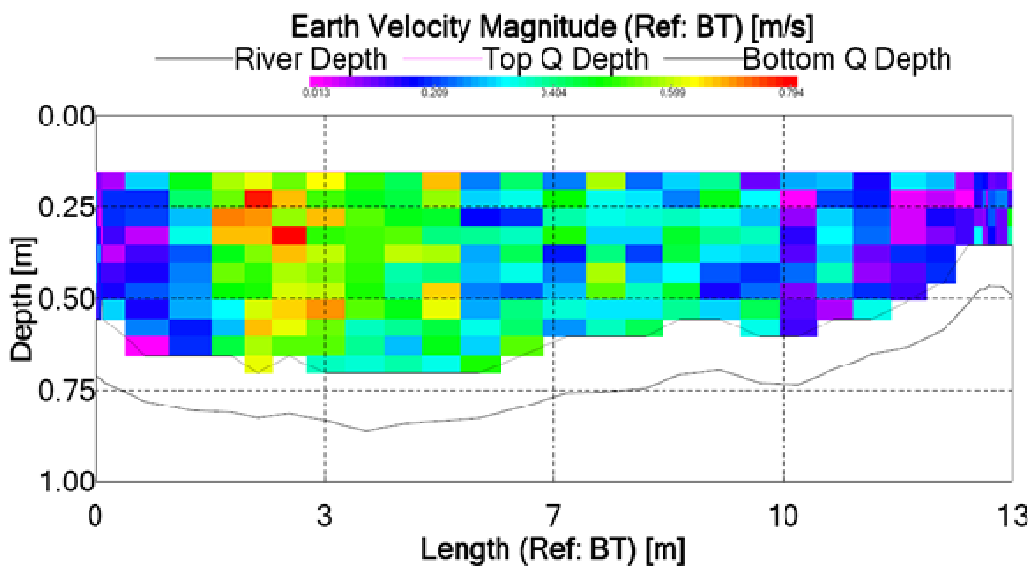
Composantes	% du Débit	% de $U^2(Q)$
u'^2_s	1,47	16%
u'^2_{proj}	0,00	0%
$u'^2(Vb)$	1,10E-05	0%
$u'^2(V)$	5,55E-05	0%
$u'^2(h)$	3,46E-03	0%
u'^2_{extp}	7,81	83%
u'^2_m	0,15	2%
Corrélation	1,94E-03	0%
$u_{(c)}'^2$	9,43	
$\sqrt{u_{(c)}'^2}$	3,07	
Résultats		
$U' (k=2)$	6,1	%
$U (k=2)$	0,90	m^3/s
$Q (ADCP)$	14,6	m^3/s



La contribution principale est encore pour la partie extrapolée u'_{extp} pour un débit extrapolé de 35 %.

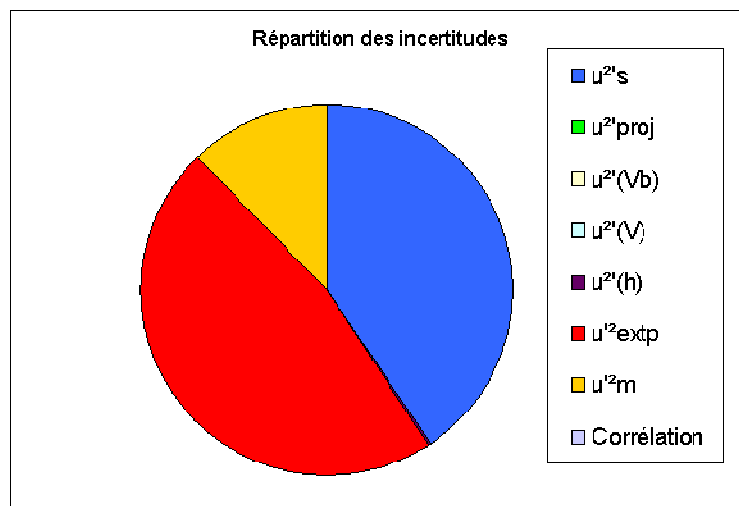
Saint Jean du Bruel sur la Dourbie (données Cemagref du 25/03/2010) ADCP StreamPro 2400kHz

Ce jaugeage réalisé pendant une formation à des agents de l'ONEMA. Les conditions de mesures sont bonnes, la section bien adaptée aux mesures ADCP. La dispersion est de 2 % sur les six transects.



Profil de vitesse à Saint Jean du Bruel (Echelle de vitesse de 0 à 0,7m/s)

Composantes	% du Débit	% de $U^2(Q)$
u^2_s	1,47	41%
u^2_{proj}	0,00	0%
$u^2(V_b)$	4,18E-05	0%
$u^2(V)$	1,01E-04	0%
$u^2(h)$	3,13E-03	0%
u^2_{extp}	1,70	47%
u^2_m	0,44	12%
Corrélation	4,25E-03	0%
$u_{(c)}'^2$	3,62	
$\sqrt{u_{(c)}'^2}$	1,90	
Résultats		
U' (k=2)	3,8	%
U (k=2)	0,10	m^3/s
Q (ADCP)	2,59	m^3/s



Ce jaugeage présente la meilleure incertitude élargie sur les 13 exemples traités. Pourtant la dispersion des mesures n'est pas la meilleure (2 %) et 37 % du débit est extrapolé.

ANNEXE 3

Protocole d'utilisation de la feuille de calcul Uadcp.xls

Mode opératoire

Protocole d'utilisation de la feuille de calcul Uadcp.xls

Vers. :


Date :

Page :

MO/HHMET/LGI-014


Date	Nature des modifications	Version
01/02/2011	Création du document	1

Rédigé par :	Vérifié par :	Approuvé par :
Nom(s) : <i>G. DRAMAIS</i>	Nom(s) : <i>J. Le Coz</i>	Nom(s) : <i>A. Paquier</i>
Date : 01/02/2011 Signature(s) : \\Datahhly\hhmet\smqhh\sinus\sinus001.xls	Date : Signature(s) : \\Datahhly\hhmet\smqhh\sinus\sinus001.xls	Date : Signature(s) : \\Datahhly\hhmet\smqhh\sinus\sinus001.xls

 <p>Cemagref Sciences, eaux & territoires UR Hydrologie-Hydraulique Equipe métrologie <i>Démarche Qualité</i></p>	Mode opératoire Protocole d'utilisation de la feuille de calcul Uadcp.xls	Vers. : <input type="text" value="1"/>
	<input type="text" value="MO/HHMET/LGI-014"/>	Date : <input type="text" value="01/02/2011"/>
		Page : <input type="text"/>

Sommaire

- 1 - OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION
- 2 - TERMINOLOGIE ET ABREVIATIONS
- 3 - DOCUMENTS DE REFERENCE
- 4 - DOCUMENTS ASSOCIES AU MODE OPERATOIRE
- 5 - LOGICIELS REQUIS
- 6 - DEROULEMENT DU MODE OPERATOIRE
 - 6-1 Sélection des transects
 - 6-2 Saisie dans la feuille de calcul
 - 6-3 Post-traitement de la série dans WinriverII
 - 6-4 Création d'un fichier ASCII
 - 6-5 Fréquence de l'instrument et écart-type expérimental sur les vitesses
 - 6-6 Résultats

 <p>Cemagref Sciences, eaux & territoires UR Hydrologie-Hydraulique Equipe métrologie Démarche Qualité</p>	<p>Mode opératoire</p> <p>Protocole d'utilisation de la feuille de calcul Uadcp.xls</p>	<p>Vers. : <input type="text" value="1"/></p>
	<p>MO/HHMET/LGI-014</p>	<p>Date : <input type="text" value="01/02/2011"/></p> <p>Page : <input type="text"/></p>

1 - OBJET et DOMAINE d'APPLICATION

- Ce mode opératoire présente les outils permettant d'obtenir un résultat de débit et son incertitude associée dans le cas d'un jaugeage ADCP (6 transects) avec un capteur ADCP TRDI.
- Ce mode opératoire est destiné aux opérateurs de l'équipe métrologie de l'unité de recherche hydrologie hydraulique formés à l'utilisation de l'ADCP et ayant suivi une formation préalable aux logiciels TRDI.

2 - TERMINOLOGIE ET ABREVIATIONS

ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler

ASCII : American Standard Code for Information Interchange

TRDI : Teledyne RD Instruments

3 - DOCUMENTS DE REFERENCE

Mode opératoire MO/HHMET/MSP002 version 2 du 12/07/2010 : Jaugeages à l'ADCP : Réglages et acquisition de données.

Mode opératoire MO/HHMET/COM005 version 1 du 17/04/2009 : Export et traitement de données bathymétriques.

Dramais. G. 2011. *Quantification des incertitudes d'un jaugeage par profileur acoustique à effet Doppler*, Mémoire CNAM.

WinriverII User's guide. Février 2007. Manuel technique, 162p.

4 - DOCUMENTS ASSOCIES AU MODE OPERATOIRE

La feuille de calcul Uadcp110201.xls disponible sur le réseau du Cemagref de Lyon : dataahly/hhmet/outils/notices&softs/ADCP/incertitudes/


Le fichier d'export d&b.tff disponible sur le réseau du Cemagref de Lyon : dataahly/hhmet/outils/notices&softs/ADCP/incertitudes/

5 - LOGICIELS REQUIS

Logiciels adaptés à la distribution Windows XP.

PlanADCP.exe version 2.06 disponible gratuitement <http://www.rdinstruments.com/> (consulté le 01.02.2011)

WinriverII.exe version 2.07 disponible gratuitement <http://www.rdinstruments.com/> (consulté le 01.02.2011)

 <p>Cemagref Sciences, eaux & territoires UR Hydrologie-Hydraulique Equipe métrologie Démarche Qualité</p>	<p>Mode opératoire</p> <p>Protocole d'utilisation de la feuille de calcul Uadcp.xls</p>	<p>Vers. : <input type="text" value="1"/></p>
	<p>MO/HHMET/LGI-014</p>	<p>Date : <input type="text" value="01/02/2011"/></p>
		<p>Page : <input type="text"/></p>

6 - DEROULEMENT DU MODE OPERATOIRE

6-1 Sélection des transects

Suite à un jaugeage réalisé conformément au mode opératoire MO/HHMET/MSP002, 6 transects sont exploités avec Winriverll.exe :

- Le fichier mnt est ouvert et seuls sont activés les 6 transects du jaugeage.
- Si des erreurs de saisies ont été renseignées sur la fiche d'enregistrement de terrain de type EN/HHMET/JAU002 correspondante au jaugeage considéré, les corrections (de laisse par exemple) sont modifiées manuellement dans le fichier .mnt.

6-2 Saisie dans la feuille de calcul

La feuille de calcul Uadcp110201.xls permet la saisie des données obtenues pendant les étapes 6-3 et 6-4 de ce document. Les consignes sont rappelées dans la feuille de calcul sous forme de commentaires. Les données à saisir dans la feuille de calculs sont :

- Depuis Winriverll.exe : les récapitulatifs de mesures ou « historic tabular » (touche F12), obtenus suite aux différents calages de paramètres.
- Les lisses maximales et minimales sont calculées par la feuille Uadcp110201.xls et intégrés dans les post-traitements avec Winriverll.exe.
- Depuis l'export ASCII de Winriverll.exe : la profondeur moyenne et le nombre moyen de cellules par ensemble.
- La fréquence de l'instrument et l'écart-type expérimental obtenu par PlanADCP.exe sont saisis manuellement.

6-3 Post-traitement de la série dans Winriverll

Une fois le fichier de mesure .mnt ouvert dans Winriverll.exe seuls les 6 transects utilisés pour la mesure doivent être cochés dans la fenêtre « measurement management ».

Principe des traitements :


Les paramètres de post-traitement sont modifiés à partir de la configuration active (F3) et appliqués aux transects du jaugeage (clic droit puis ctrl+F1 dans la fenêtre de configuration). La série de transects est rejouée en post-traitement (ctrl+F5 dans la fenêtre measurement management). Ensuite chaque « historic tabular » (F12) est copié/collé dans la feuille Uadcp110201.xls dans les cellules prévues à cet effet.

Détail :

- F3 puis Onglet processing/Partie Crosssectional Area

Il faut extraire successivement deux « historic tabular » après avoir modifié les paramètres suivant :

- Cocher « parallel to average course » puis appliquer aux transects et exporter.
- Cocher « perpendicualar to mean flow » puis appliquer aux transects et exporter.

 <p>Cemagref Sciences, eaux & territoires UR Hydrologie-Hydraulique Equipe métrologie Démarche Qualité</p>	<p>Mode opératoire</p> <p>Protocole d'utilisation de la feuille de calcul Uadcp.xls</p>	<p>Vers. : <input type="text" value="1"/></p>
	<p>MO/HHMET/LGI-014</p>	<p>Date : <input type="text" value="01/02/2011"/></p> <p>Page : <input type="text"/></p>

- F3 puis Onglet Discharge/Partie Parameters

Il faut extraire successivement cinq « historic tabular » après avoir modifié les paramètres suivants :

- « Top discharge method » : **Power** / « Bottom discharge method » : **Power** / « Power curve coeff » : **0.1667** (paramétrage par défaut). Puis appliquer aux transects et exporter.
- « Bottom discharge method » : **Power** / « Power curve coeff » : **0.1** (loi puissance en 1/m avec m=10). Puis appliquer aux transects et exporter.
- « Bottom discharge method » : **Power** / « Power curve coeff » : **0.25** (loi puissance en 1/m avec m=4), pris en compte pour le Q_{bot} . Puis appliquer aux transects et exporter.
- « Top discharge method » : **3 points slope** / « Bottom discharge method » : **no slip**. Puis appliquer aux transects et exporter.
- « Top discharge method » : **Constant**. Puis appliquer aux transects et exporter.

- F3 puis onglet Onget Edge Estimates & onglet Discharge

Il faut extraire successivement les deux « historic tabular » ci-dessous :

- Onget Edge Estimates « Left Bank edge type » : **Triangular** / « Right Bank edge type » : **Triangular** & Onglet Discharge saisir manuellement les valeurs de laisses données dans la feuille Uadcp110201.xls dans la cellule « shore distance left min » « shore distance right min ». Puis appliquer aux transects et exporter.
- Onget Edge Estimates « Left Bank edge type » : **Rectangular** / « Right Bank edge type » : **Rectangular** & Onglet Discharge saisir manuellement les valeurs de laisses données dans la feuille Uadcp110201.xls dans la cellule « shore distance left max » « shore distance right max ». Puis appliquer aux transects et exporter.

6-4 Export ASCII

Principe :


Un fichier ASCII est généré à partir du premier transect de la série. Les données sont ensuite insérées dans la feuille Uadcp.xls. La création et l'utilisation des fichiers d'export .tff permettant de générer des fichiers ASCII sont détaillées dans la notice de WinriverII User's guide et dans le mode opératoire MO/HHMET/COM005.

Détail :

Le fichier type d'export d&b.tff contient deux paramètres à exporter :

- Le nombre de cellules de vitesses par ensemble ou bin « Nb. of good bins »
- La profondeur moyenne par ensemble « Beams average depth ».

Une fois généré, le fichier ASCII résultant peut être copié/collé et converti en deux colonnes dans le fichier Uadcp.xls dans les cellules prévues à cet effet.

 <p>Cemagref Sciences, eaux & territoires UR Hydrologie-Hydraulique Equipe métrologie Démarche Qualité</p>	<p align="center">Mode opératoire</p> <p align="center">Protocole d'utilisation de la feuille de calcul Uadcp.xls</p> <p align="center">MO/HHMET/LGI-014</p>	<p>Vers. : <input type="text" value="1"/></p> <p>Date : <input type="text" value="01/02/2011"/></p> <p>Page : <input type="text"/></p>
--	--	--

6-5 Fréquence de l'instrument et écart-type expérimental sur les vitesses

- La fréquence de l'instrument est saisie lors de la mesure sur la fiche d'enregistrement de terrain de type EN/HHMET/JAU002 correspondante au jaugeage considéré. La fréquence peut aussi être obtenue dans l' « ensemble header tabular » de WinriverII.exe, après avoir ouvert le fichier .mnt du jaugeage considéré.
- L'écart-type expérimental sur les vitesses est obtenu par le logiciel PlanADCP.exe. Les données d'entrée de ce logiciel sont les commandes et modes d'acquisition déterminés par l'opérateur avant la mesure. Ces commandes sont renseignées sur la fiche d'enregistrement de terrain de type EN/HHMET/JAU002 correspondante au jaugeage considéré. Elles sont aussi disponibles dans la configuration active (F3) / onglet « commands » du fichier .mnt du jaugeage considéré.

6-6 Résultats

Les résultats sont présentés sous forme d'un tableau récapitulant le résultat de la mesure et son incertitude élargie ($k=2$). Les sources d'incertitudes et leur répartition apparaissent également sous forme graphique.

Bibliographie

ALDEGHERI M., 1979. *Manuel d'hydrométrie Tome IV Mesure des débits à partir des vitesses*, Orstom, Paris, 324p.

CARTER R. W., ANDERSON I. E., 1963. Accuracy of current meter measurements. *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, **8**, 105-115.

CAMENEN B., LE COZ J., 2008. *Logiciel Q+*. Note sur les différentes méthodes de dépouillement des jaugeages selon la méthode d'exploration des vitesses et méthode d'estimation des incertitudes associées. Note interne. Cemagref de Lyon. 45p.

CHOQUETTE Y., 2010. Hydro Quebec, Communication personnelle.

DRAMAIS G., 2009. *Mesures ADCP dans le bassin d'étalonnage de l'OFEV*. Rapport d'essais. Cemagref de Lyon, 10p.

DRAMAIS G., 2010. *Mesures de débit au moulin de Cantobre (12)*. Rapport d'essais. Cemagref de Lyon, 9p.

DUFAR L., 2010. *Jaugeages par exploration du champ des vitesses – Notice du logiciel de dépouillement et de détermination de l'écart à la norme ISO 748*. Note interne. Société du Canal de Provence, 11p.

FULFORD J.M., SAUER V.B., 1986. Comparison of velocity interpolation methods for computing open-channel discharge. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper*, **2290**, 139–144.

GONZALES-CASTRO J.A., MUSTE M., 2007. Framework for estimating uncertainty of ADCP measurements from a moving boat by standardized uncertainty analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, **133 (12)**, 1390-1410.

HERSCHY R.W., 2002. The uncertainty in a current meter measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, **13 (5-6)**, 281-284.

HUCKEL T., 2011. *Rapport de stage*. Mémoire d'ingénieur ECAM, 67p.

ISO 748. 2009. *Hydrométrie : Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de moulinets ou de flotteurs*. Norme internationale, 47p.

ISO 3455. 2007. *Hydrométrie : Étalonnage des moulinets en bassins découverts rectilignes*. Norme internationale, 15p.

ISO 5168. 2005. *Mesure de débit des fluides : Procédures pour le calcul de l'incertitude*. Norme internationale, 75p.

ISO/TS 24154. 2005. *Hydrométrie : Mesure de la vitesse et du débit des rivières au moyen de profileurs à effet Doppler*, Specification technique, 15p.

KIM D., YU K., 2010. Uncertainty estimation of the ADCP velocity measurements from the moving vessel method, (I) Development of the framework. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-5.

LAMY N., 2009. *Performances et améliorations des protocoles de bathymétrie au Cemagref de Lyon*. Mémoire d'ingénieur ESGT-CNAM, 84p.

LE BARBU E., DRAMAIS G., LE COZ J., 2008. *Contrôle de courantomètres dans un bassin de carène*. Rapport d'essais. Cemagref de Lyon, 30 p.

LE COZ J., PIERREFEU G., BROCHOT J.F., et al. 2007. Jaugeage des rivières par ADcP : pour une culture commune, *Houille Blanche – Revue internationale de l'eau*, 4, 111-118.

LE COZ J., PIERREFEU G., SAYSSET G., et al. 2008. *Mesures hydrologiques par profileur Doppler*, QUAE, Paris, 164 p.

LE COZ J., CAMENEN B., DRAMAIS G., et al. 2011. *Guide technique pour le contrôle des débits réglementaires*. A paraître, 182p.

MUSTE M., YU K., GONZALES-CASTRO J.A., et al. 2004. Methodology for estimating ADCP measurement uncertainty in open-channel flows. *Proceedings of the 2004 World Water and Environmental Resources Congress*, 2148-2160.

MUSTE M., 2009. Communication personnelle.

NF ENV 13005. 1999. *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. Guide ISO, 120p.

OBBERG K., 2002. In Search of Easy-to-Use Methods for Calibrating ADCP's for Velocity and discharge Measurements. *Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE*, 11p.

OBBERG K., MORLOCK S. E., CALDWELL W. S., 2005. Quality-assurance plan for discharge measurements using acoustic Doppler current profilers, *Scientific investigations report*, 46p.

OBBERG K., MUELLER D.S., 2007. Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers, *Journal of Hydraulic Engineering*, **133 (12)**, 1421-1432.

OLIVIER A., 2004. *Maîtrise de la précision de mesure de débit avec un profileur de courant à effet Doppler*. Mémoire d'ingénieur ECL, 64p.

OLIVIER A., PIERREFEU G., SCOTTI M., et al. 2009. Incertitude des mesures de débit réalisées a l'ADCP, *Houille Blanche – Revue internationale de l'eau*, **3**, 132-137.

PIERREFEU G., 2009. *Compte rendu intervention terrain Hydrométrie – Hydrographie*, Note interne CNR, 15p.

RD INSTRUMENTS., 1996. *Acoustic Doppler Current Profiler - Principles of Operation - A Practical Primer*, Notice technique, 57p.

RD INSTRUMENTS. 1997. *Vessel mount ADCP technical manual*. Notice technique, 283 p.

SAUER V.B., MEYER R.W., 1992. Determination of Error in Individual Discharge Measurements. *U.S. Geological Survey Report*, 92-144.

SHIH H., PAYTON C., SPRENKE J., et al. 2000. Towing Basin Speed Calibration of Acoustic Doppler Current Profiling Instruments. *Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management ASCE*, 10p.

SIMPSON M. R., 2001. Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler. *U.S. Geological Survey Report*, 123p.

SONTEK. 2007. Discharge uncertainty calculations using a SonTek FlowTracker. Note technique, 23p.

Liste des figures

<i>Fig. 1 a : Déploiement mobile de deux ADCP</i>	9
<i>Fig. 1 b : Vue de dessous d'un capteur ADCP et de son support</i>	9
<i>Fig. 2 : Notion d'incertitude de mesure : distribution estimée de la vraie valeur (inconnue) autour de la valeur mesurée.</i>	13
<i>Fig. 3 : Déploiement d'un ADCP dans le canal d'étalonnage de l'OFEV (Berne, Suisse) en 2008.</i>	16
<i>Fig. 4 a : Schéma d'un ADCP immergé sous la surface de l'eau.</i>	19
<i>Fig. 4 b : Représentation des faisceaux en configuration Janus</i>	19
<i>Fig. 5 : L'effet Doppler</i>	20
<i>Fig. 6 : Exemple de répartition des points de mesure de vitesse ADCP dans une section du Suran à Varambon. (Capture d'écran du logiciel Winriver II.</i>	21
<i>Fig. 7 : Exemple de répartition des points de mesure au courantomètre classique dans la section de jaugeage.</i>	21
<i>Fig. 8 : Calcul du débit élémentaire à travers une cellule, en mode référence bottom-track (vue de dessus)</i>	23
<i>Fig. 9 : Exemple de profil de débit avec extrapolation par loi puissance (Winriver II)</i>	25
<i>Fig. 10 : Evolution de l'incertitude-type composée en fonction du nombre de verticales</i>	35
<i>Fig. 11 : Profil (moyenné sur 3 ensembles) de vitesses à Roquemaure (Echelle de vitesses de 0 à 2m/s) ADCP Broad Band 600kHz (données CNR)</i>	45
<i>Fig. 12 : Répartition des composantes d'incertitudes pour le jaugeage RQ1</i>	46
<i>Fig. 13 : Profil de vitesses de Pierrelatte (Echelle de vitesses de 0,3 à 1,3m/s) ADCP Rio Grande 1200 kHz (données Cemagref)</i>	47
<i>Fig. 14 : Répartition des composantes d'incertitudes pour le jaugeage PIE</i>	48
<i>Fig. 15 : Profil de vitesses à Caderousse (Echelle de vitesses de 0 à 0,6m/s) ADCP Rio Grande 1200 kHz (données Cemagref)</i>	49
<i>Fig. 16 : Répartition des composantes d'incertitudes pour le jaugeage ROM</i>	50
<i>Fig. 17 : Profil de vitesses à Romans sur Isère (Echelle de vitesses de 0 à 0,1m/s) ADCP Rio Grande 1200 kHz (données CNR)</i>	51
<i>Fig. 18 : Répartition des composantes d'incertitudes pour le jaugeage CAD</i>	52
<i>Fig. 19 : Profil de vitesses à Nant (12) sur le Durzon (Echelle de vitesses de 0 à 0,9m/s) ADCP StreamPro 2400 kHz (données Cemagref)</i>	52

<i>Fig. 20 & 21: Déploiement d'un ADV Flowtracker sur perche et d'un ADCP SP2400 kHz sur le Durzon à Nant.</i>	53
<i>Fig. 22 : Répartition des composantes d'incertitudes pour le jaugeage NAN</i>	55
<i>Fig. 23 : Courbe de tarage du Charbonnières à Charbonnières les bains</i>	56
<i>Fig. 24 : Profil de vitesses du Charbonnières à Charbonnières les bains (Echelle de vitesses de 0 à 0,6m/s) ADCP StreamPro 2400 kHz (données Cemagref)</i>	57
<i>Fig. 25 : Répartition des composantes d'incertitudes pour le jaugeage CHA</i>	58
<i>Fig. 26 : Profil vertical de débit représentatif de l'exemple CHA</i>	58
<i>Fig. 27. : Trajectoires différentes d'un ADCP à Pyrimont (Rhône)</i>	61

Liste des tableaux

<i>Tab. I : Définition et type d'évaluation des termes de l'expression de l'incertitude composée $u(ADCP)$</i>	32
<i>Tab. II : Incertitude sur la vitesse ADCP/Fond en cm/s pour un ADCP 1200 kHz</i>	38
<i>Tab. III : Incertitude sur la vitesse de l'eau par rapport à l'ADCP</i>	39
<i>Tab. IV : Exemple d'incertitudes dans les mesurages de profondeur ($k=1$)</i>	41
<i>Tab. V : Résultats d'application de la méthode d'évaluation des incertitudes sur les jaugeages par ADCP mobile</i>	44
<i>Tab. VI : Résultats pour RQI</i>	46
<i>Tab. VII : Résultats pour PIE</i>	48
<i>Tab. VIII : Résultats pour ROM</i>	50
<i>Tab. IX : Résultats pour CAD</i>	52
<i>Tab. X : Résultats pour NAN</i>	55
<i>Tab. XI : Proportion du débit extrapolé dans l'exemple du Charbonnières</i>	56
<i>Tab. XII : Résultats pour CHA</i>	58

RESUME

Les jaugeages permettent à la fois de connaître le débit d'une rivière ponctuellement et de qualifier des stations de mesure du débit en continu (stations hydrométriques). Parmi les techniques de jaugeage, celles par exploration du champ des vitesses consistant à mesurer les vitesses de l'écoulement et la profondeur en différents points de la section sont les plus répandues. Les profileurs acoustiques à effet Doppler (ADCP) sont des instruments utilisés pour le jaugeage. La profusion et la complexité des mesures ADCP font que leur analyse nécessite des méthodes de post-traitement adaptées ; les incertitudes associées au débit jaugé par ADCP mobile sont difficiles à évaluer. L'objectif du travail est de mettre au point, tester et valider une méthodologie opérationnelle de calcul des incertitudes sur les débits issus de jaugeages complets par exploration du champ des vitesses par ADCP. Le paramétrage de la méthode implique quelques hypothèses simplificatrices. Les résultats obtenus sont réalistes, les jaugeages effectués dans les meilleures conditions présentent des incertitudes inférieures à 4 % ($k=2$). Pour aller plus loin, l'évaluation des différents paramètres peut encore être améliorée.

Mots clés : Profileur acoustique de courant à effet Doppler, hydrométrie, incertitudes, jaugeage, débit.

SUMMARY

Stream gaugings improve the knowledge of stage-discharge curves. Among the various techniques for discharge measures, the velocity field method consists in determining the velocity and the cross-sectional area of water flowing in open channels. There are different sensors and measurement procedures. Acoustic Doppler Current Profilers are river discharge instruments. A lot of data are acquired during the measurement sessions and also the post processing is complex. The « moving boat » is a deployment procedure for discharge measurements with ADCP (and measurements are difficult to assess). This study investigates a new operational method for uncertainty evaluation on discharge measurement made with ADCP on moving boats. This method is successfully tested on an array of discharge measurements in French rivers. Setting the appropriate parameters necessitates the adoption of some simple hypotheses, results are realistic. Good conditions stream gaugings show an uncertainty inferior to 4 % ($k=2$). To go further the method settings could be improved.

Key words : Acoustic Doppler current profiler, hydrometry, uncertainty, stream gaugings, discharge.