

Mesures hydrologiques par profileur Doppler

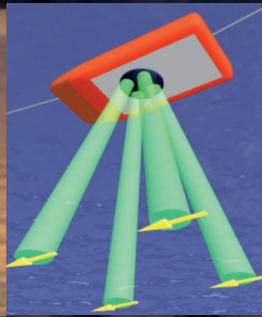
J. Le Coz

G. Pierrefeu

G. SAYSSET

J.-F. Brochot

P. Marchand



éditions
Quæ

Mesures hydrologiques par profileur Doppler (aDcp)

Groupe Doppler

Jérôme Le Coz¹ – Gilles Pierrefeu² – Gérard SAYSSET³

Jean-François Brochot⁴ – Pierre Marchand⁵

¹Cemagref, ²CNR, ³EDF, ⁴MEEDDAT, ⁵IRD



© Éditions Quæ, 2008

ISBN : 978-2-7592-0286-7

Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage est interdite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Table des matières

Préambule	1
Introduction	1
Le groupe Doppler	2
Mode d'emploi de ce guide	3
Termes techniques fréquemment employés	4
Sigles et abbréviations	6
I Comprendre le fonctionnement de l'aDcp	9
1 Principe de fonctionnement de l'appareil	11
1.1 Vélocimétrie Doppler	11
1.1.1 L'effet Doppler	11
1.1.2 Analyse de la fréquence de l'écho	14
1.1.3 Modes de mesure	16
1.2 Mesure des profils de vitesse	18
1.2.1 Mesure du tirant d'eau	18
1.2.2 Séquençage des vitesses radiales (<i>range-gating</i>)	20
1.2.3 Des vitesses radiales aux vitesses 2D/3D	21
1.2.4 Configurations géométriques	21
1.2.5 Le suivi du fond (<i>bottom-tracking</i>)	23
1.2.6 <i>Pings</i> et <i>Ensembles</i>	25
1.3 Principales limitations techniques	25
1.3.1 Portée (<i>range</i>)	25
1.3.2 Zone aveugle (<i>blanking</i>)	26
1.3.3 Interférence des émissions secondaires (<i>side-lobe</i>)	26

1.3.4	Hypothèse d'homogénéité des vitesses	28
1.3.5	Cellules et ensembles invalidés (<i>bad bins</i>)	29
1.3.6	Dispersion des mesures de vitesse	29
2	Application au jaugeage des cours d'eau	33
2.1	Calcul du débit par déploiement mobile, en mode autonome	33
2.1.1	Principe du calcul de débit	33
2.1.2	Calcul du débit à travers une cellule	35
2.1.3	Estimation des débits non mesurés	37
2.1.4	Méthodes d'extrapolation des profils verticaux	38
2.1.5	Estimation du débit près des rives	43
2.1.6	Cas d'une cellule ou d'un ensemble invalidés (<i>bad bin</i>)	44
2.2	Autres calculs de débit	45
2.2.1	Déploiement mobile en mode non autonome	45
2.2.2	Déploiement stationnaire (jaugeage par verticales)	47
2.3	Qualité de la mesure de débit par aDcp mobile	48
2.3.1	Etat de l'art métrologique	48
2.3.2	Contrôles en laboratoire	49
2.3.3	Évaluations <i>in situ</i>	50
2.3.4	Régates aDcp	52
2.4	Problème du fond mobile	53
2.4.1	Impact sur le suivi du fond et la mesure de débit	54
2.4.2	Détection <i>in situ</i>	55
2.4.3	Quantifications et mesures correctives	55
2.5	Autres problèmes liés aux conditions de mesure	56
2.5.1	Végétation, fond encombré	56
2.5.2	Matières en suspension (MES)	57
2.5.3	Température et salinité	57
2.5.4	Bulles d'air	58
2.5.5	Matériaux ferreux	58
2.5.6	Biais directionnel	60
2.5.7	Erreurs inexplicées	60

II	Jauger à l'aDcp	61
3	Matériel et mise en œuvre	63
3.1	Modèles de profileurs	63
3.1.1	Profileurs « standard »	64
3.1.2	Profileurs pour faibles tirants d'eau	65
3.1.3	Profileurs horizontaux (aDcp-H)	66
3.1.4	Profileurs de laboratoire	68
3.2	Supports et modes de déploiement	69
3.2.1	Généralités	69
3.2.2	Supports flottants inertes, modes de traction	70
3.2.3	Supports flottants motorisés télécommandés	76
3.2.4	Fixation à une embarcation	78
3.2.5	Autres types de déploiement	78
3.3	Mise en œuvre	81
3.3.1	Alimentation, communication, logiciels	81
3.3.2	Résumé du matériel nécessaire au jaugage	81
3.3.3	Quelques problèmes courants.	83
3.3.4	Maintenance et suivi	84
4	Configuration	85
4.1	Principales étapes avec WinRiver1.06	86
4.1.1	Lancement de WinRiver(Acquire)	86
4.1.2	Paramètres de communication	87
4.1.3	Paramètres de mesure (configuration)	88
4.1.4	Acquisition	91
4.1.5	Dépouillement avec WinRiver(PlayBack)	91
4.2	Principales commandes TRDI	93
4.3	Les modes de mesure TRDI	95
4.3.1	<i>Water Modes</i>	95
4.3.2	<i>Bottom Modes</i>	97

5	Procédure de jaugeage	99
5.1	Préliminaires	99
5.1.1	Choix de la section	99
5.1.2	Fiche de terrain	100
5.1.3	Conditions de mesure	100
5.1.4	Vérifications matériel avant mesure	101
5.1.5	Technique de pilotage, consignes de sécurité	102
5.2	Traversées	103
5.2.1	Mise en température	103
5.2.2	Premier aller-retour	104
5.2.3	Conduite de la campagne de mesure	106
5.2.4	Situations de fort courant	108
6	Établissement et critique du débit jaugeé	111
6.1	Sur un <i>transect</i>	111
6.1.1	Choix des paramètres intervenant dans le calcul du débit	111
6.1.2	Inspection des données	112
6.1.3	Critères de qualité du débit sur un <i>transect</i>	112
6.2	Sur une succession de <i>transects</i>	113
6.2.1	Établissement du débit moyen	113
6.2.2	Critères de qualité du débit moyen, validation	113
6.2.3	Cas des écoulements instationnaires (crue, marée, éclusées...)	114
6.3	Procédures d'archivage	115
6.3.1	Archivage du débit moyen validé	115
6.3.2	Archivage des données brutes aDcp	115
III	Pour aller plus loin	117
7	Autres types d'exploitation en rivière	119
7.1	Bathymétrie	119
7.1.1	Géoréférencement	119

7.1.2	Correction de la déviation magnétique du compas interne	121
7.1.3	Calcul des points cotés	123
7.1.4	Intérêt de la bathymétrie par aDcp	123
7.2	Mesure du champ de vitesse moyen 3D	124
7.2.1	Exploration en plan	125
7.2.2	Profils verticaux	125
7.2.3	Structure de l'écoulement	127
7.3	Suivi des débits en continu (aDcp horizontaux)	129
7.3.1	Les H-aDcp en rivière	129
7.3.2	Mise en oeuvre	129
7.3.3	Calcul du débit total	130
7.4	Mesure des caractéristiques turbulentes	131
7.5	Mesure du transport de la charge de fond	132
7.6	Mesure des flux de matières en suspension	133
A	Memento de terrain (EDF-DTG Brive)	137
B	Fiches de terrain pour jaugeage avec aDcp	141
C	Calcul des points cotés pour un aDcp TRDI	145

Préambule

Introduction

Les profileurs acoustiques de vitesse à effet Doppler (aDcp, pour *acoustic Doppler current profiler*) ont été initialement développés pour l'exploration des écoulements dans les domaines océaniques et côtiers. Des adaptations technologiques dans les années 1990 ont permis d'étendre le champ d'application des aDcp aux eaux continentales moins profondes (Yorke et Oberg, 2002).

Parmi tous les appareils à ultrasons réalisant des mesures de vitesse d'écoulement par effet Doppler et utilisables sur les cours d'eau, il convient de distinguer d'emblée les vélocimètres Doppler ou aDv (*acoustic Doppler velocimeter*, mesure de vitesse ponctuelle), les débitmètres Doppler (mesure d'une vitesse moyenne dans le faisceau acoustique) et les profileurs Doppler (aDcp, mesure de vitesses réparties le long d'un axe).

L'objectif de ce guide est de rassembler l'expérience accumulée par les jaugeurs français sur les profileurs Doppler en rivière, de présenter les potentialités et les limitations techniques de l'outil, de contribuer à l'unification des pratiques hydrométriques. Gageons que cette synthèse à la fois théorique et pratique sera également utile à l'opérateur, à l'utilisateur de données aDcp et au métrologue, au moment où un processus international de normalisation se poursuit depuis la publication de la spécification technique TS24154 (ISO, 2005) en novembre 2005.

Le groupe Doppler

Depuis 1994-1996, les organismes français ayant en charge le suivi du débit des rivières (DIREN, CNR, EDF, IRD, VNF, ...) se sont équipés massivement d'aDcp. Les équipes d'hydrométrie sont en effet séduites par le gain de temps de mise en œuvre et la possibilité de réaliser des jaugeages dans des conditions pour lesquelles les techniques conventionnelles sont très lourdes voire impraticables.

Le groupe Doppler (Le Coz *et al.*, 2007c) est né du besoin ressenti par de nombreux utilisateurs français de partager leurs expériences pour mieux maîtriser ce nouvel outil, apparaissant souvent comme une boîte noire, et pour mieux exprimer leurs besoins méthodologiques. Constitué au tout début de 2005 à l'initiative de la CNR, d'EDF et du Ministère en charge de l'Environnement, le groupe est ouvert à tout utilisateur désireux d'échanger sur les applications de l'aDcp, en particulier le jaugeage des cours d'eau. Une liste de diffusion électronique (avec archivage des messages et documents partagés) est hébergée par le *Cemagref* (<http://sympa.lyon.cemagref.fr>). En outre, le groupe Doppler est en liaison avec le groupe de travail international sur les instruments et techniques de mesure de débit que l'OMM a constitué en 2007 (Pilon *et al.*, 2007).

Les profils et les terrains de jeu des participants sont variés, mais les profileurs acoustiques concernés sont très majoritairement issus de la firme californienne Teledyne RDI. Le groupe Doppler est ouvert à tout utilisateur d'aDcp en rivière, a fortiori de marque différente (SonTek/YSI, NorTek/Qmetrix...). Le présent guide méthodologique traite de l'utilisation de tout type d'aDcp, mais certains paragraphes s'appliquent plus particulièrement au matériel et au logiciel Teledyne RDI. Si nécessaire, les versions ultérieures de ce guide développeront davantage les spécificités des autres équipements. Il est bien entendu que le groupe Doppler, groupe d'utilisateurs indépendant des fournisseurs, ne recommande a priori aucune marque de profileurs ou d'accessoires pour profileurs.

Mode d'emploi de ce guide

Les chapitres sont regroupés en trois parties correspondant chacune à différents objectifs de lecture :

La partie I s'adresse à ceux qui veulent approfondir les principes de fonctionnement de l'aDcp.

- Chapitre 1 : exposé scientifique et technique sur l'effet Doppler appliqué à la mesure des écoulements ;
- Chapitre 2 : application au jaugeage des rivières et calcul du débit.

La partie II traite plus particulièrement des questions méthodologiques auxquelles sont confrontées les opérateurs amenés à pratiquer des jaugeages de rivière par aDcp.

- Chapitre 3 : descriptif synthétique des équipements couramment utilisés en France pour les jaugeages de rivière par aDcp ;
- Chapitre 4 : paramétrage des aDcp de type TRDI et choix du mode de mesure associé ;
- Chapitre 5 : mode opératoire pour jauger sur site appliqué aux aDcp de type TRDI mais généralisable ;
- Chapitre 6 : critique des résultats aussi bien lors du jaugeage qu'en post-traitement lors du dépouillement.

Enfin, la partie III propose des pistes d'approfondissement pour ceux qui veulent en savoir plus sur l'aDcp.

- Chapitre 7 : utilisation de l'aDcp en rivière à d'autres fins que le jaugeage ;
- Bibliographie.

Tout commentaire sur ce guide méthodologique sera utile aux futures révisions du document (envoyer à jerome.lecoz@cemagref.fr).

NB1 : on emploie dans tout ce guide l'acronyme aDcp pour désigner tout type de profileur acoustique de vitesse à effet Doppler, sans distinction de modèle ni de constructeur. En effet, comme pour mobylette ou frigidaire, l'usage courant a retenu ce terme générique issu par antonomase d'un nom de marque déposée (ADCP[®]).

NB2 : certains produits commerciaux courants (profileurs, accessoires et logiciels) sont cités ou décrits succinctement à titre illustratif, sans prétention à l'exhaustivité ni à l'évaluation quantitative. Les lecteurs intéressés doivent naturellement s'adresser aux différents fournisseurs pour obtenir les caractéristiques des produits dans leur version la plus récente.

Termes techniques fréquemment employés

Pour faciliter la lecture de ce guide méthodologique, sont explicités ci-dessous des termes techniques parmi les plus utilisés par les jaugeurs en rivière. Certains de ces termes, suivis d'un astérisque, sont caractéristiques (mais pas spécifiques) du matériel de type TRDI – le plus répandu en France. En général les mêmes notions sont désignées par des termes proches dans le cas des autres marques. L'usage des jaugeurs est le plus souvent de conserver les termes techniques anglais du constructeur, dans un souci de précision et de simplicité. Toutefois, l'explicitation de ces termes en français est souvent utile pour mieux faire la part de ce qui est spécifique à un matériel donné et de ce qui relève de concepts plus généraux.

- *Bin** : cellule, *i.e.* section de hauteur d'eau fixe (hauteur de la cellule) et de largeur fonction de la vitesse de déplacement du bateau (distance entre deux ensembles) ; la mesure de vitesse est affectée au centre de la cellule ;
- *Blanking** : zone aveugle proche de la surface, cf. § 1.3.2 ;
- *Bottom** : tout ce qui concerne le fond (suivi, zone inexplorée, etc.) ;
- *Bottom tracking** : suivi de fond, cf. § 1.2.5 ;
- *Broadband, narrowband, pulse-coherent* : ces trois principaux types de modes de mesure sont expliqués au § 1.1.3.
- *Ensemble** : verticale de mesure composée de cellules (§ 1.2.6) ; en mode mobile autonome (cf. § 2.1), ensemble d'impulsions permettant d'établir une mesure élémentaire des vitesses d'écoulement sur la verticale, du tirant d'eau et de la vitesse de déplacement par rapport au fond ;

- *Heading**, *Pitch**, *Roll*/Cap*, *tangage*, *roulis* : ce sont les trois angles de rotation du capteur dans l'espace, définis au § 1.2.4 ;
- *Lag** : court intervalle de temps séparant deux impulsions sonores, ou deux échantillons du signal renvoyé, dans le cas d'une analyse par autocorrélation (cf. § 1.1.2 ;
- *Length** : longueur développée du transect entre le premier ensemble mesuré et le dernier, *i.e.* somme des distances mesurées par suivi de fond entre chaque ensemble ;
- *MG** (*Made Good*) : une grandeur MG est calculée à partir du premier et du dernier ensemble valide d'un transect ; ainsi la Distance MG et la Course MG désignent respectivement la longueur de corde et l'azimut définis par le premier et le dernier ensemble valide d'un transect ;
- Mode de jaugeage autonome/non autonome : lors d'un jaugeage par déploiement d'un aDcp mobile (traversées), on parle de mode autonome lorsque le débit est calculé par suivi du fond (*bottom-tracking*) dans le référentiel de l'aDcp, sans recours à un compas interne ou externe ni à un système de positionnement type GPS (cf. chapitre 2) ;
- Mode de mesure : un mode de mesure est défini par un protocole de tir d'impulsions acoustiques lié à une stratégie d'analyse du signal renvoyé au transducteur ; les différents types de modes de mesure sont introduits au § 1.1.3 et la configuration des modes de mesure TRDI est détaillée au § 4.3.
- Monostatique/Bistatique : un profileur est dit bistatique lorsque l'écho analysé est reçu par un ou plusieurs récepteurs distincts de l'émetteur, généralement unique ; la plupart des profileurs commerciaux (§ 3.1.1) sont monostatiques, le signal étant émis et reçu par la même céramique ; ils comportent un à quatre transducteurs montés sur une tête convexe ou concave (moins courant en rivière) ;
- *Ping** : impulsion ultra-sonore émise dans l'eau (§ 1.2.6) ; pour certains modes de mesure, un *ping* peut être une séquence plus ou moins complexe d'impulsions, nécessaire à l'établissement d'une mesure de vitesse (cf. § 1.1.3).

- Régate/*Regatta* : campagne de mesure de débit simultanée avec plusieurs aDcp, dans le but de comparer les performances des différents appareils et paramétrages, ce qui est particulièrement intéressant en présence d’une mesure de débit fiable prise comme référence, cf. § 2.3.4 ;
- *Self-Noise**/Double exposition : bruitage mutuel de deux signaux sonores se rencontrant lors de leur propagation dans l’eau, cf. § 1.1.3 ;
- *Ship-Track* : trajectoire de l’aDcp dans le plan horizontal, calculée par suivi de fond (*bottom-tracking*) ou par système de positionnement externe (GPS) ;
- *Shore Distance** : laisse, *i.e.* distance à la rive du premier ou dernier ensemble enregistré ;
- *Side-Lobe** : se rapporte à la zone inexplorée proche du fond à cause des réflexions parasites des lobes secondaires des faisceaux acoustiques , cf. § 1.3.3 ;
- *Top** : tout ce qui concerne la surface (zone inexplorée ou blanking) ;
- Transducteur/*Transducer* : céramique piézo-électrique permettant à la fois d’émettre et de recevoir des ultrasons ; dans le premier cas, un signal électrique est converti en signal acoustique, et *vice versa* dans le second cas ;
- *Transect** : enregistrement de mesures aDcp en général sur une traversée plus ou moins perpendiculaire au cours d’eau ;
- Ultrasons : signal acoustique (onde de pression) de fréquence supérieure à 40 kHz (inaudible par l’homme) ; le son se propage dans l’eau à une célérité proche de 1500 m/s (§ 1.1.1) ;
- *Width** : largeur, *i.e.* Distance MG augmentée des deux laisses.

Sigles et abréviations

- aDcp : *acoustic Doppler current profiler* ; profileur acoustique de vitesse à effet Doppler ;
- ADCP : *Acoustic Doppler Current Profiler* ; nom de marque de profileur déposé par TRDI ;

- ADP : *Acoustic Doppler Profiler* ; nom de marque de profileur déposé par SonTek ;
- aDv : *acoustic Doppler velocimeter* ; vélocimètre acoustique à effet Doppler ;
- ADVP : *Acoustic Doppler Velocity Profiler* ; nom d'un profileur de laboratoire développé à l'EPFL et au LEGI (§ 3.1.4) ;
- *Cemagref* : Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement ;
- CEREGE : Centre européen de recherche et d'enseignement en géosciences de l'environnement (Aix-en-Provence) ;
- CETIAT : Centre technique des industries aérauliques et thermiques ; le CETIAT (Villeurbanne) est un laboratoire d'études, d'essais et d'étalonnages dans les domaines de l'aéraulique, de la thermique et de l'acoustique ;
- CNR : Compagnie nationale du Rhône ;
- DIREN : Direction régionale de l'environnement ;
- EDF-DTG : Électricité de France-Division technique générale ;
- EPFL : École polytechnique fédérale de Lausanne ;
- H-aDcp : *Horizontal-aDcp*, cf. § 3.1.3 ;
- IRD : Institut de recherche pour le développement (ex-ORSTOM) ;
- ISO : International Standard Organization, Organisme international de normalisation ;
- LEGI : Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels (Grenoble) ;
- LS-PIV : *Large Scale - Particle Image Velocimetry* ; méthode de mesure des vitesses en surface d'écoulement par analyse d'images vidéo (Hauet *et al.*, 2008) ;
- LTHE : Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement (Grenoble) ;
- MEEDDAT : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (ministère en charge de l'environnement) ;

- MES : matières en suspension, *i.e.* la fraction solide particulaire présente dans la colonne d'eau, que les particules soient organiques ou minérales ;
- NGF : Nivellement général de la France, actuellement réseau de nivellement officiel en France métropolitaine ;
- OFEG : Office fédéral des eaux et de la géologie (Suisse) ;
- OMM : Organisation météorologique mondiale ;
- PC/PDA : *Personal Computer* (ordinateur personnel) ; *Personal Digital Assistant* (assistant numérique personnel ou ordinateur de poche) ;
- TRDI : Teledyne RD Instruments (fournisseur) ;
- USGS : *United States Geological Survey*, organisme fédéral américain notamment en charge du suivi des débits dans les cours d'eau ;
- VNF : Voies navigables de France (ministère en charge de l'équipement).

Première partie

Comprendre le
fonctionnement de l'aDcp

