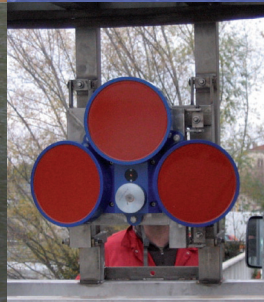
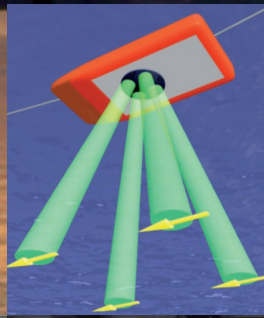


# Mesures hydrologiques par profileur Doppler

J. Le Coz  
G. Pierrefeu  
G. SAYSSET  
J.-F. Brochot  
P. Marchand



éditions  
Quæ



# Mesures hydrologiques par profileur Doppler (aDcp)

## Groupe Doppler

Jérôme Le Coz<sup>1</sup> – Gilles Pierrefeu<sup>2</sup> – Gérard SAYSSET<sup>3</sup>

Jean-François Brochot<sup>4</sup> – Pierre Marchand<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Cemagref, <sup>2</sup>CNR, <sup>3</sup>EDF, <sup>4</sup>MEEDDAT, <sup>5</sup>IRD



© Éditions Quæ, 2008

ISBN : 978-2-7592-0286-7

Le code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> 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<sup>e</sup>.

# Table des matières

<b>Préambule</b>	<b>1</b>
Introduction . . . . .	1
Le groupe Doppler . . . . .	2
Mode d'emploi de ce guide . . . . .	3
Termes techniques fréquemment employés . . . . .	4
Sigles et abbréviations . . . . .	6
<b>I Comprendre le fonctionnement de l'aDcp</b>	<b>9</b>
<b>1 Principe de fonctionnement de l'appareil</b>	<b>11</b>
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
<b>2</b>	<b>Application au jaugeage des cours d'eau</b>	<b>33</b>
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

---

<b>II</b>	<b>Jauger à l'aDcp</b>	<b>61</b>
<b>3</b>	<b>Matériel et mise en œuvre</b>	<b>63</b>
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
<b>4</b>	<b>Configuration</b>	<b>85</b>
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

<b>5</b>	<b>Procédure de jaugeage</b>	<b>99</b>
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
<b>6</b>	<b>Établissement et critique du débit jaugé</b>	<b>111</b>
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
<b>III</b>	<b>Pour aller plus loin</b>	<b>117</b>
<b>7</b>	<b>Autres types d'exploitation en rivière</b>	<b>119</b>
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
<b>A</b>	<b>Memento de terrain (EDF-DTG Brive)</b>	<b>137</b>
<b>B</b>	<b>Fiches de terrain pour jaugeage avec aDcp</b>	<b>141</b>
<b>C</b>	<b>Calcul des points cotés pour un aDcp TRDI</b>	<b>145</b>



# 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](mailto: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

