

# Contrôle des débits réglementaires

Application de l'article L. 214-18  
du Code de l'environnement

## Avertissement

Le domaine d'application de ce guide est celui du contrôle des débits réglementaires, en particulier le débit minimum biologique devant être maintenu à l'aval immédiat des ouvrages de prise d'eau.

Il s'adresse en premier lieu aux agents chargés de missions de police judiciaire pour les guider dans le choix des méthodes et leurs conditions de mise en œuvre, lors des mesures qu'ils sont amenés à effectuer sur le terrain pour constater les infractions à la réglementation.

Ce guide technique n'a pas vocation à être utilisé dans le domaine de la prévision des crues.

## Auteurs

Jérôme **Le Coz**,  
unité de recherche hydrologie-hydraulique, Cemagref Lyon

Benoît **Camenen**,  
unité de recherche hydrologie-hydraulique, Cemagref Lyon

Guillaume **Dramais**,  
unité de recherche hydrologie-hydraulique, Cemagref Lyon

José **Ribot-Bruno**,  
UMR - GEAU (gestion de l'eau, acteurs et usages), Cemagref Montpellier

Michel **Ferry**,  
direction de la prospective et de la veille scientifique et technique, Cemagref Antony

Jean-Louis **Rosique** (retraité),  
unité de recherche hydrosystèmes et bioprocédés, Cemagref Antony

## Contributeurs Onema

Dominique **Baril**,  
département du contrôle des usages, Onema

Pierre **Boyer**,  
département du contrôle des usages, Onema

Michel **Larinier**,  
pôle écho-hydraulique de Toulouse, Cemagref - Onema

Pascale **Boizard**,  
chef du département du contrôle des usages, DCUAT, Onema

Claire **Roussel** et Béatrice **Gentil**,  
délégation de l'information et de la communication, Onema

## L'Office national de l'eau et des milieux aquatiques

Créé en avril 2007 par la loi sur l'eau du 30 décembre 2006, l'Onema est un établissement public sous tutelle du ministère en charge du développement durable. Sa finalité est de favoriser la gestion globale et durable de la ressource en eau et des écosystèmes aquatiques. Il contribue ainsi à la reconquête de la qualité des eaux et l'atteinte de leur bon état d'ici à 2015, objectif fixé par la directive cadre européenne sur l'eau.

L'Onema est présent sur l'ensemble du territoire métropolitain ainsi qu'en Corse et dans les départements et collectivités d'outre-mer au titre de la solidarité de bassin.

Ses 900 agents ont pour mission :

- mobiliser la recherche publique, soutenir des programmes de recherche et organiser une expertise de haut niveau pour accompagner et évaluer la mise en œuvre des politiques publiques de l'eau ;
- coordonner le système d'information sur l'eau et participer à l'acquisition des données relatives à l'eau et aux milieux aquatiques, aux activités et aux services associés ;
- mettre à disposition ces informations auprès des autorités européennes et nationales, des gestionnaires de l'eau ou du grand public ;
- contribuer au contrôle des usages de l'eau et à la surveillance des milieux aquatiques, participer à la prévention de leur dégradation, à leur restauration et à la préservation de la biodiversité ;
- apporter aux acteurs de la gestion de l'eau son appui technique et sa connaissance de terrain.

Pour mener à bien ses missions, l'Onema travaille en étroite collaboration et en complémentarité avec l'ensemble des acteurs de l'eau.

Document réalisé par la délégation à l'information et la communication

Secrétariat de rédaction et suivi de fabrication : Béatrice Gentil

Conception, maquette et iconographie : Graphies

Impression : IME

Cet ouvrage a été réalisé avec des encres végétales sur du papier PEFC 100 % issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées, chez un imprimeur respectant toutes les normes environnementales.



© Onema, septembre 2011

Le guide **Contrôle des débits réglementaires** a été conçu pour aider à l'application de l'article L 214-18 du Code de l'environnement, qui impose le maintien d'un débit minimal à l'aval immédiat de tout ouvrage installé dans le lit d'un cours d'eau. Il a pour objectif d'apporter des éléments pratiques de méthodologie pour la réalisation de mesures de débit instantané, dans le cadre d'un contrôle de débit minimal réglementaire.

Il s'adresse donc plus particulièrement aux agents chargés de constater les infractions à la police de l'eau et à la police de la pêche (agents des services départementaux de l'État, de l'Onema, de la Gendarmerie nationale, etc.). Élaboré en vue de l'application de l'article L 214-18, ce manuel peut être utilisé dans d'autres cas où l'on souhaite connaître le débit ou simplement la vitesse de l'écoulement.

Orienté vers la mesure ponctuelle des faibles débits, ce document ne constitue ni un guide d'hydrométrie générale, ni une description exhaustive des différents modes de détermination du débit d'un cours d'eau. Son ambition, tant sur le plan de la théorie que de la pratique, est de fournir une présentation rigoureuse, simple et concrète, accessible au plus grand nombre. Son utilisation se conçoit en complément d'une bonne connaissance du milieu et d'un accès à la documentation technique du matériel utilisé.



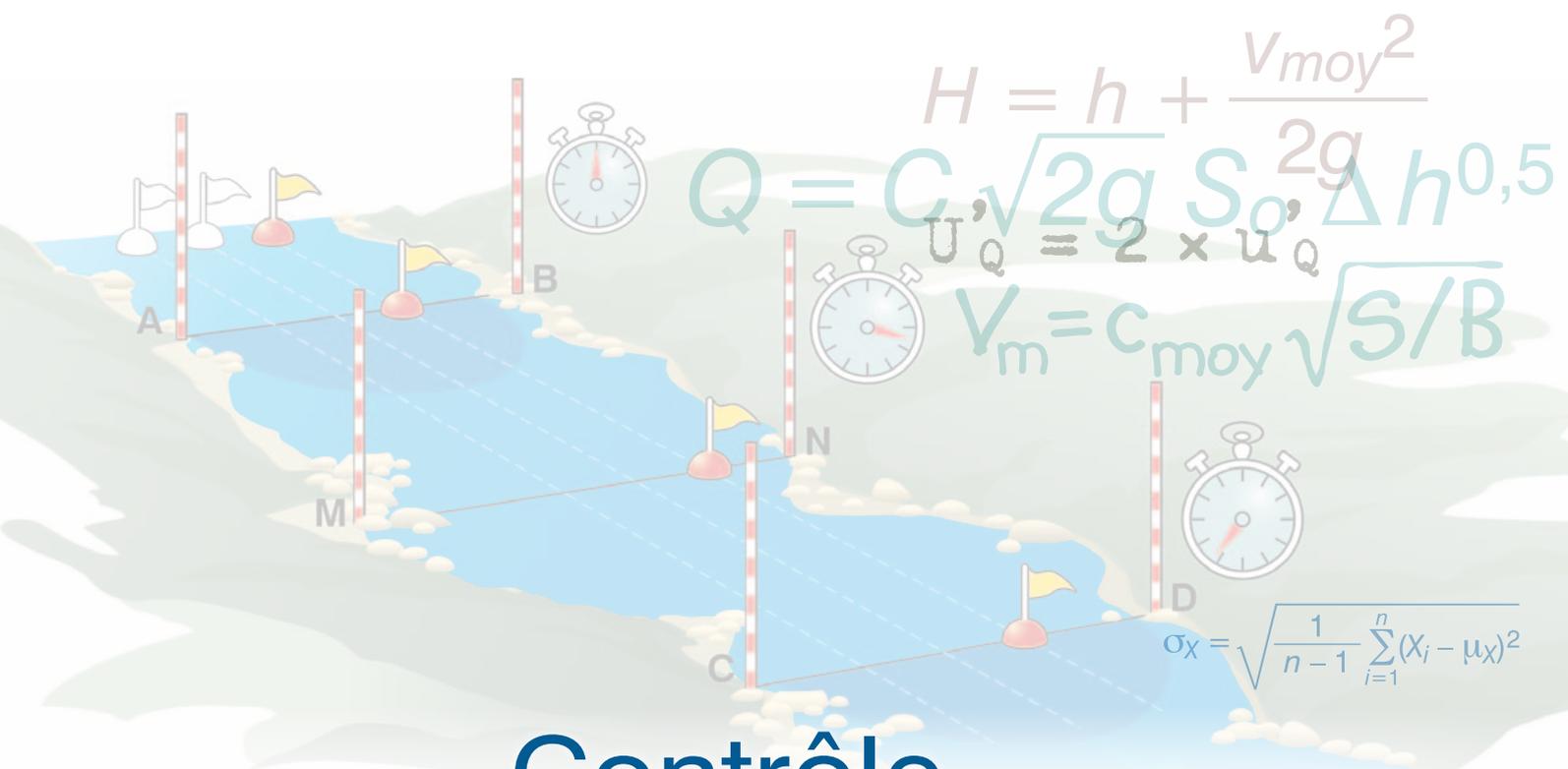
Ce document s'inscrit dans une nouvelle collection de **Guides techniques de la police de l'eau** qui consacre la complémentarité de la science et du droit. En effet, la législation relative à l'eau et aux milieux aquatiques et, plus globalement, celle de l'environnement, se construit en s'appuyant sur l'état des connaissances scientifiques et techniques dont le développement suscite les évolutions politiques du droit.

Ces guides fournissent ainsi aux agents chargés de la police de l'eau les outils et les méthodes pour réaliser les actes du contrôle du respect des normes légales et réglementaires de préservation de l'environnement.



Direction générale – Le Nadar – 5 square Félix-Nadar – 94300 Vincennes  
Tél : 01 45 14 36 00 – Fax : 01 45 14 36 29

[www.onema.fr](http://www.onema.fr)



# Contrôle des débits réglementaires

Application de l'article L 214-18  
du Code de l'environnement

Jérôme **Le Coz**, Benoît **Camenen**, Guillaume **Dramais**  
José **Ribot-Bruno**, Michel **Ferry**, Jean-Louis **Rosique**

# Sommaire

<b>1 Avant-propos</b> .....	4
<b>2 Introduction au contrôle des débits réglementaires</b>	
2.1 Notions d'hydrologie .....	7
2.2 Dispositions juridiques liées au débit des cours d'eau .....	10
2.3 Contrôle du débit minimal « biologique ».....	13
2.4 Incertitudes de mesure.....	16
2.5 Sécurité des opérateurs .....	22
<b>3 Méthode par capacité</b>	
3.1 Principe de la méthode .....	25
3.2 Mode opératoire .....	25
3.3 Propositions d'aménagement des conditions de mesure .....	26
3.4 Calcul d'incertitude.....	27
<b>4 Exploration du champ des vitesses : les courantomètres</b>	
4.1 Principe des méthodes par exploration du champ des vitesses .....	29
4.2 Matériel .....	30
4.3 Mode opératoire .....	36
4.4 Dépouillement des mesures .....	42
4.5 Calcul d'incertitude.....	51
<b>5 Exploration du champ des vitesses : les profileurs Doppler</b>	
5.1 Principe de la mesure par ADCP .....	55
5.2 Matériel .....	58
5.3 Mode opératoire .....	60
5.4 Dépouillement et critique des mesures .....	61
5.5 Calcul d'incertitude.....	62
<b>6 Exploration du champ des vitesses : les flotteurs</b>	
6.1 Principe de la méthode .....	65
6.2 Matériel .....	66
6.3 Mode opératoire .....	67
6.4 Dépouillement des mesures .....	69
6.5 Évaluation des incertitudes .....	72

## 7 Méthode par dilution

7.1 Principe de la méthode .....	75
7.2 Mode opératoire .....	78
7.3 Calcul du débit .....	82
7.4 Calcul d'incertitude.....	83

## 8 Méthodes hydrauliques

8.1 Généralités.....	85
8.2 Mode opératoire .....	86
8.3 Formules pour déversoirs .....	88
8.4 Formules pour orifices et pour vannes .....	93
8.5 Autres ouvrages et dispositifs .....	95
8.6 Calcul d'incertitude.....	98

## Annexes

<b>A Notations</b> .....	103
<b>B Tableau comparatif des différentes méthodes</b> .....	107
<b>C Glossaire</b> .....	109
<b>D Bibliographie sélective</b> .....	111
D.1 Métrologie	
D.2 Hydraulique et hydrologie générales	
D.3 Hydrométrie	
D.4 Méthodes par exploration du champ des vitesses	
D.5 Profileurs acoustiques Doppler (ADCP)	
D.6 Méthode par dilution	
D.7 Méthodes hydrauliques (ouvrages)	
<b>E Modèles de fiches de terrain pour le relevé des observations et des mesures</b> .....	115

# Avant-propos

Cet ouvrage a été réalisé dans le cadre de la convention de partenariat 2008-2009 Onema - Cemagref, au titre de l'action 31.3 du domaine *Méthodes pour le contrôle et la police*. Il s'agit de la refonte du *Guide pratique d'hydrométrie. Application de l'article L. 232-5 du Code rural (1991)*.

Ce guide a été conçu pour aider à l'application de l'article L. 214-18 du Code de l'environnement, qui impose le maintien d'un débit minimal à l'aval immédiat de tout ouvrage installé dans le lit d'un cours d'eau. Il a pour objectif d'apporter des éléments pratiques de méthodologie pour la réalisation de mesures de débit instantané (jaugeages), dans le cadre d'un contrôle de débit minimal réglementaire. Il s'adresse donc plus particulièrement aux agents chargés de constater les infractions à la police de l'eau et à la police de la pêche (agents des services départementaux de l'État, de l'Onema, de la Gendarmerie nationale, etc.). Élaboré en vue de l'application de l'article L. 214-18, ce manuel peut être utilisé dans d'autres cas où l'on souhaite connaître le débit ou simplement la vitesse de l'écoulement. On peut citer, par exemple, les contrôles de pollution pour lesquels il est intéressant d'associer des informations concernant les quantités d'eau écoulée aux teneurs obtenues lors des prélèvements, afin d'évaluer la charge polluante dans le cours d'eau. L'ambition, tant sur le plan de la théorie que de la pratique, est de fournir une présentation rigoureuse, tout en restant simple et concrète, afin d'être accessible aux agents chargés de missions de contrôle de police. Son utilisation se conçoit en complément d'une bonne connaissance du milieu acquise sur le terrain et d'un accès à la documentation technique du matériel utilisé.



Michel Larinier, Onema

Fig. 1.1 - Exemple d'ouvrage avec dérivation d'eau pouvant nécessiter un contrôle de débit.

Les informations contenues dans ce manuel proviennent d'origines diverses :

- sources bibliographiques : documents relatifs à l'hydrologie, l'hydraulique, l'hydrométrie, la métrologie, tels que des ouvrages fondamentaux, des rapports et notes techniques spécialisés, des normes françaises et internationales ;
- autres sources : observation et expérience de terrain, développements théoriques propres, remarques et critiques de techniciens spécialistes de la mesure des débits en rivière (Services de l'État, Onema, Cemagref) ou d'utilisateurs potentiels du guide (agents Onema).



Jérôme Le Coz - Cemagref

Fig. 1.2 - Exemple d'ouvrage avec dérivation d'eau pouvant nécessiter un contrôle de débit.

Ce document, orienté vers la mesure ponctuelle des faibles débits, ne constitue ni un guide d'hydrométrie générale, ni une description exhaustive des différents modes de détermination du débit d'un cours d'eau. Il présente pour chaque grand type de méthode **une sélection des procédés qui paraissent les plus adaptés au contrôle de l'application de la réglementation**. Les méthodes d'évaluation du débit décrites présentent des degrés de difficulté variés, depuis l'estimation grossière permettant de déterminer l'opportunité de mobiliser un service spécialisé, jusqu'à la mesure effective en vue de la constatation d'éventuelles infractions. Ce guide fournit donc à la fois des éléments de base apportant une connaissance rapide des diverses méthodes, ainsi que des explications plus détaillées sur les opérations de terrain et les calculs nécessaires à l'obtention de résultats suffisamment fiables et exacts, assortis d'une incertitude de mesure.

Pour la mise en œuvre de la plupart des méthodes exposées, il est indispensable de **disposer du matériel adéquat et d'avoir suivi un minimum de formation pratique préalable**. Pour des compléments d'information, on pourra se reporter aux différents ouvrages et notes techniques cités en bibliographie [Annexe D]. On trouvera également en fin de document une liste des notations [Annexe A], un tableau comparatif des différentes méthodes [Annexe B], un glossaire sommaire [Annexe C] et des modèles de fiches de terrain pour le relevé des observations et des mesures [Annexe E].



# Introduction au contrôle des débits réglementaires

## 2

L'objectif principal de ce guide est d'apporter des éléments techniques sur les différentes méthodes pouvant être employées pour mesurer le débit d'un cours d'eau en vue d'un contrôle de débit minimal. L'aspect réglementaire ne sera traité que très sommairement dans ce chapitre.

## 2.1 Notions d'hydrologie

### 2.1.1 Débit d'un cours d'eau

#### 2.1.1.1 Définition du débit

Le débit  $Q$  est le volume d'eau  $Vol$  passant à travers une section d'un cours d'eau pendant une unité de temps  $T$  :

$$Q = \frac{Vol}{T}$$

Dans les unités internationales, un volume étant exprimé en  $m^3$  et le temps en s, le débit est exprimé en  $m^3/s$ . On peut également exprimer les faibles débits en L/s.

On appelle jaugeage une mesure ponctuelle du débit instantané à travers la section d'un cours d'eau. Ce débit instantané est en réalité mesuré sur une période allant de quelques minutes à plus d'une heure, typiquement, selon la méthode de mesure et la taille du cours d'eau. Dans le cadre d'un contrôle réglementaire, on se placera en condition de régime hydraulique permanent (débit constant sur toute la période de mesure). Cette condition sera vérifiée en surveillant la constance du niveau d'eau, et l'absence de manœuvre d'ouvrages hydrauliques en amont et en aval du site de mesure.

#### 2.1.1.2 Expression d'une mesure de débit

Toute mesure est entachée d'une erreur, dont l'amplitude probable peut être estimée par un calcul d'incertitude [→ section 2.4]. L'incertitude d'une mesure de débit dépend de nombreux facteurs : type de méthode employée, performances des appareils de mesure et des opérateurs, influence des conditions d'environnement, rigueur dans le dépouillement, etc. Il est important de toujours penser cette incertitude en pourcentage de la valeur mesurée, et non en L/s ou  $m^3/s$ , car elle varie généralement en proportion du débit jaugé. S'agissant de mesures de débit réalisées dans les conditions naturelles, les incertitudes sont rarement inférieures à 5 à 10 %, et jamais inférieures à 1 %. **La mesure de débit sera présentée en indiquant son incertitude élargie**, pour un niveau de confiance à 95 % (facteur d'élargissement  $k = 2$ ).

#### → Exemple

$Q = 38 \text{ L/s} \pm 10 \%$   
 (niveau de confiance 95 %,  $k = 2$ )  
 ou  
 $Q = 38 \pm 4 \text{ L/s}$   
 (niveau de confiance 95 %,  $k = 2$ )  
 ou  
 $34 < Q < 42 \text{ L/s}$   
 (niveau de confiance 95 %,  $k = 2$ )

Le nombre de chiffres significatifs<sup>1</sup> utilisés pour exprimer la valeur mesurée devra être cohérent avec l'incertitude élargie indiquée. Quel que soit le procédé utilisé, **on ne présentera donc jamais de mesures de débit avec plus de trois chiffres significatifs**, et le plus souvent avec deux chiffres significatifs. Dans le cadre du contrôle des débits, **on arrondira de préférence vers une valeur supérieure** (arrondir par excès), de manière à garder une marge de sécurité.

#### → Exemples

40,6 L/s ± 10 %  
→ arrondir à 41 L/s

0,602 L/s ± 7 %  
→ arrondir à 0,61 L/s

1,154 m<sup>3</sup>/s ± 5 %  
→ arrondir à 1,16 m<sup>3</sup>/s

## 2.1.2 Le débit moyen interannuel (module)

### 2.1.2.1 Définition du module

En hydrologie, on désigne par module (ou débit moyen interannuel,  $Q_M$ ) la moyenne des débits moyens annuels ( $Q_{MA,i}$ ) sur une période de référence. Le module se rattache à un point du réseau hydrographique et est couramment exprimé en m<sup>3</sup>/s :

$$Q_M = \frac{Q_{MA,1} + Q_{MA,2} + \dots + Q_{MA,n}}{n}$$

- $Q_M$  : module [m<sup>3</sup>/s]
- $n$  : nombre d'années de données de débit
- $Q_{MA,1}, Q_{MA,2}, \dots, Q_{MA,n}$  : débits moyens annuels [m<sup>3</sup>/s]

Le débit moyen annuel  $Q_{MA,i}$  est la moyenne arithmétique des débits moyens journaliers sur toute l'année  $i$  considérée. De manière équivalente, il peut être calculé comme la moyenne arithmétique des débits mensuels pondérés par le nombre de jours de chaque mois.

Le module étant relatif à un point particulier du cours d'eau, il importe de **définir précisément la situation de l'ouvrage le long du cours d'eau**.

Le module (ou débit moyen interannuel) est calculé à partir des informations disponibles portant sur **une période minimale de cinq années**. Dans la pratique, sur des cours d'eau non influencés, la convergence vers une valeur stable nécessite entre dix et quinze années de chroniques de bonne qualité. Il est préférable de prendre en considération **la période la plus longue possible** (idéalement au moins trente ans de mesures consécutives) de façon à réduire l'influence des années exceptionnellement humides (ou avec de fortes crues) ou des années exceptionnellement sèches sur la valeur du module (et donc du débit minimal réglementaire).

La valeur d'un module en un point peut être modifiée par des prélèvements importants non restitués (irrigation, évaporation d'un aéroréfrigérant, alimentation en eau potable, transferts de bassin à bassin). En cas de prélèvements modifiant substantiellement le débit à l'amont d'un ouvrage, le module naturel doit être reconstitué notamment en y réintégrant la valeur du prélèvement amont qui ne retourne pas au cours d'eau et en établissant dans la mesure du possible une cohérence avec les autres données de débit sur le bassin.

L'interpolation à l'intérieur d'un bassin versant, ou l'extrapolation entre bassins versants, au prorata des surfaces drainées donne des résultats satisfaisants dès lors que le régime pluviométrique et la géologie sont proches. Des difficultés peuvent néanmoins survenir en contexte géologique fracturé ou karstique. Pour faciliter les comparaisons entre bassins versants, il est commode d'utiliser le module spécifique  $Q_{M,s}$  (habituellement exprimé en L/s/km<sup>2</sup>), en rapportant la valeur du module  $Q_M$  (exprimée en L/s) à la superficie du bassin  $S_b$  (exprimée en km<sup>2</sup>) :

$$Q_{M,s} = 1\,000 \times \frac{Q}{S_b}$$

À titre indicatif, en France, le module spécifique  $Q_{M,s}$  varie de 0 à 60 L/s/km<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> - Il s'agit des chiffres connus avec certitude plus le premier chiffre incertain.

### 2.1.2.2 Établissement du module

Pour une station hydrométrique donnée [→ section 8.8], les débits annuels et le module peuvent être obtenus auprès du gestionnaire de la station, en particulier par l'intermédiaire de la banque nationale de données hydrométriques (« Banque Hydro »). Lorsque le calcul direct du module s'avère impossible (insuffisance ou absence de données), il faut utiliser des méthodes d'estimation plus complexes (extrapolation, corrélation de bassin à bassin, relation pluie-débit, etc.), dont la présentation n'entre pas dans le cadre de ce document.

Dans tous les cas, **il est vivement conseillé de faire appel au service hydro-métrique compétent** (DREAL le plus souvent) pour obtenir une estimation précise du module et de toute valeur de débit caractéristique en un point du réseau hydrographique. Pour les stations influencées par des ouvrages, notamment avec prélèvements et transfert d'un bassin à l'autre, il n'est pas aisé d'établir les valeurs « naturelles » et « naturelles reconstituées ».

Un outil potentiellement très utile est le logiciel LOIEAU [Cemagref, Folton et Lavabre, 2007] qui restitue les débits mensuels et effectue les statistiques de l'ensemble des variables hydrologiques, en site jaugé ou non jaugé (c'est-à-dire dépourvu de station hydrométrique). À partir de bases de données cartographiques, climatologiques et hydrologiques incorporées au logiciel, LOIEAU génère des chroniques datées de débits mensuels sur l'ensemble du réseau hydrographique d'une région. Un modèle hydrologique régionalisé permet alors une très bonne reproduction du module, et une bonne reproduction (hors zones karstiques) du débit mensuel d'étiage de fréquence quinquennale (QMNA5). La zone d'application couvre en 2009 tout le sud de la France, le bassin Seine-Normandie et certains DOM, et est en cours d'extension à tout le territoire national.

### 2.1.3 Variables caractéristiques d'étiage

Il existe de nombreuses variables permettant de caractériser l'étiage d'un cours d'eau. Sans être exhaustif, on présente ci-dessous quelques variables utilisées habituellement en hydrologie pour décrire les basses eaux. Ces variables sont généralement calculées à partir des débits journaliers considérés sur une période donnée, le plus souvent annuelle. Il faut noter que toutes ces variables sont alors relatives à l'année considérée.

- QMNA : minimum annuel des débits moyens mensuels ;
- QME : débit du mois d'étiage, mois défini comme celui dont la moyenne interannuelle des débits journaliers est la plus faible<sup>2</sup> ;
- QJNA : minimum annuel des débits journaliers ;
- DCN<sub>n</sub> : n-ième valeur de débit, lorsque l'on range les débits journaliers d'une année dans l'ordre croissant ;
- DC<sub>n</sub> : n-ième valeur de débit, lorsque l'on range les débits journaliers d'une année dans l'ordre décroissant (variable utilisée pour les étiages et les crues) ;
- VCN<sub>n</sub> : minimum de débit moyen sur n jours consécutifs<sup>3</sup> ;
- QCN<sub>n</sub> : seuil minimal de débit instantané non dépassé pendant n jours consécutifs ;

À partir de ces variables à réalisation annuelle, on déduit des informations de type statistique relatives à plusieurs années, telles que :

- la moyenne interannuelle ;
- le quantile sec, c'est-à-dire la valeur de la variable considérée qui n'est pas dépassée pour une fréquence donnée (1 année sur 2, 1 année sur 5, 1 année sur 10, etc.).

2 - QME n'est donc pas forcément le plus faible débit mensuel de l'année considérée et peut ainsi être différent de QMNA.

3 - Ainsi, la période où on observe le VCN<sub>n</sub> est celle où le volume écoulé au cours des n jours est le plus faible de l'année.

Par exemple, on utilise souvent le *QMNA5*, ou *QMNA* quinquennal, appelé aussi débit de référence d'étiage, qui est le débit mensuel minimal annuel non dépassé 1 année sur 5 (c'est-à-dire dépassé 4 années sur 5).

## 2.2 Dispositions juridiques liées au débit des cours d'eau

### 2.2.1 Débit minimal « biologique »

#### 2.2.1.1 Cadre juridique du débit minimal « biologique »

Compte tenu des enjeux qui lui sont associés, l'obligation technique de maintien d'un débit minimal « biologique » à l'aval des ouvrages entravant le lit des cours d'eau est déterminée directement par la loi, et non simplement par le règlement. Ce débit minimal « biologique » vise à garantir en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivant dans les eaux au moment de l'installation de l'ouvrage.

En premier lieu, la loi n° 84-512 du 29 juin 1984 relative à la pêche en eau douce et à la gestion des ressources piscicoles a institué une obligation légale de débit minimal « biologique » applicable à tous les ouvrages aménagés dans le lit d'un cours d'eau, alors codifié sous l'article 410 du Code rural, devenu depuis lors l'article L. 232-5 du Code rural, puis l'article L. 432-5 du Code de l'environnement.

En second lieu, la loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques a modernisé cette obligation légale, sous le nouvel article L. 214-18 du Code de l'environnement, moyennant suppression de l'article L. 432-5 dudit code.

#### → Article L. 214-18 du Code de l'environnement

*Créé par la Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006, art. 6 ; JORF 31 décembre 2006.*

I - Tout ouvrage à construire dans le lit d'un cours d'eau doit comporter des dispositifs maintenant dans ce lit un débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivant dans les eaux au moment de l'installation de l'ouvrage ainsi que, le cas échéant, des dispositifs empêchant la pénétration du poisson dans les canaux d'aménée et de fuite.

Ce débit minimal ne doit pas être inférieur au dixième du module du cours d'eau en aval immédiat ou au droit de l'ouvrage correspondant au débit moyen interannuel, évalué à partir des informations disponibles portant sur une période minimale de cinq années, ou au débit à l'amont immédiat de l'ouvrage, si celui-ci est inférieur.

Pour les cours d'eau ou parties de cours d'eau dont le module est supérieur à 80 mètres cubes par seconde, ou pour les ouvrages qui contribuent, par leur capacité de

modulation, à la production d'électricité en période de pointe de consommation et dont la liste est fixée par décret en Conseil d'État pris après avis du Conseil supérieur de l'énergie, ce débit minimal ne doit pas être inférieur au vingtième du module du cours d'eau en aval immédiat ou au droit de l'ouvrage évalué dans les mêmes conditions ou au débit à l'amont immédiat de l'ouvrage, si celui-ci est inférieur. Toutefois, pour les cours d'eau ou sections de cours d'eau présentant un fonctionnement atypique rendant non pertinente la fixation d'un débit minimal dans les conditions prévues ci-dessus, le débit minimal peut être fixé à une valeur inférieure.

II - Les actes d'autorisation ou de concession peuvent fixer des valeurs de débit minimal différentes selon les périodes de l'année, sous réserve que la moyenne annuelle de ces valeurs ne soit pas inférieure aux débits minimaux fixés en application du I. En outre, le débit le plus bas doit rester supérieur à la moitié des débits minimaux précités. Lorsqu'un cours d'eau ou une section de cours d'eau

est soumis à un étiage naturel exceptionnel, l'autorité administrative peut fixer, pour cette période d'étiage, des débits minimaux temporaires inférieurs aux débits minimaux prévus au I.

III - L'exploitant de l'ouvrage est tenu d'assurer le fonctionnement et l'entretien des dispositifs garantissant dans le lit du cours d'eau les débits minimaux définis aux alinéas précédents.

IV - Pour les ouvrages existant à la date de promulgation de la loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques, les obligations qu'elle institue sont substituées, dès le renouvellement de leur concession ou autorisation et au plus tard le 1<sup>er</sup> janvier 2014, aux obligations qui leur étaient précédemment faites. Cette substitution ne donne lieu à indemnité que dans les conditions prévues au III de l'article L.214-17.

V - Le présent article n'est applicable ni au Rhin ni aux parties internationales des cours d'eau partagés.



### 2.2.1.2 **Obligation légale de débit minimal « biologique »**

Cette obligation légale, qui s'impose à l'exploitant de l'ouvrage intéressé, est une obligation de résultat, qui doit être réalisée par tout moyen sauf prescription particulière contraire, et à tout moment de l'année. Il s'agit donc d'une obligation continue dans le temps, qui implique une surveillance et un entretien réguliers des ouvrages par l'exploitant.

La valeur du débit minimal devant être maintenue à l'aval d'un ouvrage est fixée par l'arrêté préfectoral d'autorisation, de récépissé de déclaration, ou l'arrêté et/ou décret de concession qui règle les conditions d'aménagement et d'exploitation de l'ouvrage implanté dans le lit du cours d'eau. Dans le cas où cette valeur n'a pas été précisée dans l'un de ces actes administratifs individuels, l'obligation légale s'applique malgré tout, et la valeur à maintenir sera par défaut à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2014 le dixième du débit moyen interannuel.

Le débit minimal devant être maintenu à l'aval d'un ouvrage est **un débit instantané**. Le respect de cette obligation est normalement assuré par l'aménagement d'un dispositif de restitution du débit minimal adapté à l'ouvrage de prise d'eau, permettant normalement une lecture aisée des débits restitués par l'exploitant et par les tiers intéressés.

Si le débit à l'amont immédiat de l'ouvrage est inférieur à la valeur du débit minimal fixé pour l'ouvrage, c'est ce débit entrant qui doit être restitué à l'aval, situation qui entraîne l'arrêt provisoire du prélèvement d'eau. Dans ce cas, l'exploitant de l'ouvrage est alors relevé de cette obligation de restitution du débit minimal.

### 2.2.1.3 **Détermination administrative du débit minimal « biologique »**

Le débit minimal « biologique » ne doit pas être inférieur à un plancher qui est fixé au dixième du module interannuel du cours d'eau, pour l'essentiel des installations. Il ne doit pas être inférieur au vingtième de ce module pour les ouvrages situés sur un cours d'eau dont le module est supérieur à 80 m<sup>3</sup>/s, ou pour les ouvrages hydroélectriques contribuant à la production d'électricité en période de pointe de consommation, listés par le règlement (C. env., art. R. 214-III-3).

L'acte administratif réglementant l'ouvrage peut prévoir des valeurs du débit minimal biologique différentes selon la période de l'année sans qu'elles puissent être inférieures à la moitié des valeurs planchers. Dans le cas particulier des cours d'eau présentant un fonctionnement atypique, la notion de valeur plancher ne s'applique pas.

### 2.2.1.4 **Infraction de non-respect du débit minimal « biologique »**

Le non-respect du débit minimal « biologique », résultant de la loi (C. env., art. L. 214-18) ou de l'acte administratif réglementant l'ouvrage pris notamment en application de cette loi, est réprimé par un délit spécial, prévu et réprimé par le 2<sup>o</sup> de l'article L. 216-7 dudit code.

## 2.2.2 **Autres débits réglementés**

Outre le débit minimal « biologique » de l'article L. 214-18 du Code de l'environnement, d'autres débits peuvent être réglementés par la loi ou par l'acte administratif encadrant l'exploitation d'un ouvrage implanté dans un cours d'eau.

### 2.2.2.1 Débits affectés d'utilité publique

Outre les sanctions administratives applicables de l'article L. 216-1 du Code de l'environnement, le non-respect des débits affectés déclarés d'utilité publique au sens de l'article L. 214-9 dudit code est aussi sanctionné au plan judiciaire par un délit spécial, prévu et réprimé par le 3° de l'article L. 216-7 dudit code.

### 2.2.2.2 Débits réglementés par des prescriptions particulières

L'acte administratif encadrant l'aménagement et le fonctionnement d'ouvrage implanté dans le lit d'un cours d'eau peut instituer des prescriptions particulières déterminant des obligations de maintien de débits spéciaux, sans relation avec la fonctionnalité biologique (Code de l'environnement, art. L. 214-18) ou l'affectation à un usage d'utilité publique (C. env., art. L. 214-9). Ces débits réglementés peuvent bien entendu faire l'objet d'un contrôle spécifique, qui caractérisera en cas de non respect, outre les sanctions administratives applicables en application de l'article L. 216-1 du Code de l'environnement :

- soit un délit spécial, prévu et réprimé par le 2° du I ou le III de l'article L. 512-2 du Code de l'énergie, si l'ouvrage réglementé produit de l'énergie hydraulique, respectivement selon le régime administratif de concession ou d'autorisation applicable à l'ouvrage en vertu de la police de l'énergie hydraulique ;
- soit une contravention de 5<sup>e</sup> classe, prévue et réprimée par le 3° ou le 4° de l'article R. 216-12 du Code de l'environnement si l'ouvrage réglementé ne produit pas d'énergie hydraulique, respectivement selon le régime administratif d'autorisation ou de déclaration applicable à l'ouvrage en vertu de la police de l'eau et des milieux aquatiques.

### → Article L. 214-9 du Code de l'environnement

*Modifié par la Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006, art. 5 ; JORF 31 décembre 2006.*

I - Lorsqu'un aménagement hydraulique autre que ceux concédés ou autorisés en application de la loi du 16 octobre 1919 relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique permet la régulation du débit d'un cours d'eau ou l'augmentation de son débit en période d'étiage, tout ou partie du débit artificiel peut être affecté, par déclaration d'utilité publique, sur une section de ce cours d'eau et pour une durée déterminée, à certains usages, sans préjudice de l'application de l'article L.211-8.

Le premier alinéa est applicable aux aménagements hydrauliques concédés ou autorisés en application de la loi du 16 octobre 1919 précitée à condition que l'affectation de tout ou partie du débit artificiel soit compatible avec la destination de l'aménagement, le maintien d'un approvisionnement assurant la sécurité du système électrique et l'équilibre financier du contrat de concession.

II - Le bénéficiaire de la déclaration d'utilité publique peut être l'État, une collectivité territoriale, un groupement de collectivités

territoriales ou un établissement public. Le bénéficiaire de la déclaration d'utilité publique peut concéder la gestion de ce débit affecté. Le concessionnaire est fondé à percevoir les sommes mises à la charge des usagers en application du 4° du III.

III - La déclaration d'utilité publique vaut autorisation au titre de la présente section et fixe, dans les conditions prévues par décret, outre les prescriptions pour son installation et son exploitation : 1° Un débit affecté, déterminé compte tenu des ressources disponibles aux différentes époques de l'année et attribué en priorité au bénéficiaire de la déclaration d'utilité publique ; 2° Les usages auxquels est destiné le débit affecté ; 3° Les prescriptions nécessaires pour assurer le passage de tout ou partie du débit affecté dans la section du cours d'eau considérée, dans les conditions les plus rationnelles et les moins dommageables pour les autres usagers de ce cours d'eau et dans le respect des écosystèmes aquatiques ; 4° Les conditions dans lesquelles le bénéficiaire de la déclaration d'utilité publique peut mettre à la charge des usa-

gers de ce débit tout ou partie des dépenses engagées pour assurer la délivrance du débit affecté et son passage dans le cours d'eau ; 5° Le cas échéant, les modifications à apporter au cahier des charges de la concession ou dans l'acte d'autorisation.

IV - Lorsque les conditions dans lesquelles est délivré le débit affecté causent un préjudice au gestionnaire de l'ouvrage concédé ou autorisé en application de la loi du 16 octobre 1919 précitée, le bénéficiaire de la déclaration d'utilité publique lui verse une indemnité compensant la perte subie pour la durée de la concession ou de l'autorisation restant à courir. L'indemnisation est subordonnée au maintien dans le cours d'eau du débit minimal résultant de l'application de l'article L.214-18 et n'est due que pour les volumes artificiels excédant cette valeur. La juridiction administrative est compétente pour statuer sur les litiges relatifs à cette indemnité.

V - Le présent article est applicable aux travaux d'aménagement hydraulique et aux ouvrages hydrauliques quelle que soit la date à laquelle ils ont été autorisés ou concédés.



## 2.3 Contrôle du débit minimal « biologique »

### 2.3.1 Cadre réglementaire des opérations de contrôle

#### 2.3.1.1 Agents chargés du contrôle

L'aménagement ou le fonctionnement des ouvrages implantés dans le lit d'un cours d'eau peut faire l'objet de contrôle administratif ou judiciaire, sous l'autorité respective des préfets de département ou des procureurs de la République.

Les agents compétents pour réaliser ces contrôles sont listés sous l'article L. 216-3 du Code de l'environnement. Les agents de l'Onema sont en particulier habilités à réaliser ces opérations de contrôle, tant administratif que judiciaire.

Pour la personne chargée de contrôler le débit à l'aval d'un ouvrage au niveau duquel un prélèvement d'eau est effectué, l'application de la réglementation revient à déterminer si l'on se trouve dans l'une ou l'autre des deux situations suivantes :

- si le débit aval est supérieur ou égal au débit minimal – ou au débit à l'amont immédiat de l'ouvrage si celui-ci est inférieur au débit minimal – il n'y a pas infraction ;
- si le débit aval est inférieur au débit minimal, il y a infraction.

#### 2.3.1.2 Mesure du débit (jaugeage)

Le contrôle de la valeur du débit minimal « biologique » effectivement maintenu à l'aval d'un ouvrage peut nécessiter de procéder à une ou plusieurs mesures de débit instantané, par utilisation d'une méthode hydrométrique appropriée aux caractéristiques du site et à la situation hydrologique rencontrée.

Chaque opération de contrôle doit donner lieu à une réflexion préalable sur le caractère indispensable de la mesure, le choix du lieu de la mesure, le choix de la méthode de mesure, afin d'adapter le contrôle à chaque situation rencontrée dans un souci commun de simplicité, de rigueur et d'objectivité du constat opéré.

L'évaluation du débit maintenu à l'aval de l'ouvrage fait l'objet d'une note de calcul ou un rapport de jaugeage précisant la méthode utilisée et ses conditions de mise en œuvre, notamment la valeur d'incertitude de la mesure.

#### 2.3.1.3 Suite donnée aux contrôles

Tout contrôle donne lieu à l'élaboration d'un rapport de contrôle par l'agent de constatation. Le non-respect du débit minimal « biologique » prévu par l'article L. 214-18 du Code de l'environnement caractérise une situation de non-conformité susceptible de justifier l'application de sanctions administratives prévues par l'article L. 216-1 dudit code, mais aussi au plan judiciaire un délit spécial prévu et réprimé par le 2° de l'article L. 216-7 dudit code. En cas de situation infractionnelle, un procès verbal d'infraction est établi. En cas de mesure de débit, le rapport de jaugeage y est annexé.

#### → Exemple

Module = 300 L / s

→ débit minimal

$$= 1/10 \times 300 = 30 \text{ L / s}$$

- si débit aval mesuré  
= 50 L / s  $\pm$  10 L / s  
→ pas d'infraction
- si débit aval mesuré  
= 28 L / s  $\pm$  6 L / s  
→ pas d'infraction
- si débit aval mesuré  
= 20 L / s  $\pm$  4 L / s  
→ infraction



## 2.3.2 Différentes méthodes de mesure de débit

### 2.3.2.1 Classification des méthodes

Les principales méthodes permettant de mesurer le débit s'écoulant à travers la section d'un cours d'eau sont :

- **la méthode par capacité** consistant à mesurer directement le temps de remplissage d'un récipient de volume connu ;
- **les méthodes par exploration du champ des vitesses** consistant à mesurer les vitesses de l'écoulement et la profondeur en différents points de la section. Les instruments utilisés ainsi que les protocoles de mesure sont variés. On distingue dans ce guide l'utilisation de courantomètres (mécaniques ou moulinets, électro-magnétiques, acoustiques), de profileurs acoustiques à effet Doppler (ADCP) et de flotteurs ;
- **la méthode de dilution** consistant à injecter dans l'écoulement un traceur passif en solution et à suivre l'évolution de sa concentration après bon mélange ;
- **les méthodes hydrauliques** exploitant la relation entre débit et hauteur d'eau à l'amont de dispositifs particuliers.

### 2.3.2.2 Critères de choix d'une méthode

Pour mettre en évidence l'insuffisance du débit maintenu dans un cours d'eau, il suffit que la méthode choisie puisse donner une mesure de débit inférieure au débit minimal admissible, compte tenu des incertitudes [→ fig. 2.1]. Si l'écart entre le débit mesuré et le débit minimal autorisé est important (débit mesuré inférieur au tiers du débit minimal), on peut se contenter de mettre en œuvre une méthode grossière. En revanche, plus cet écart sera faible, plus la méthode employée devra être précise et plus sa mise en œuvre nécessitera de la rigueur.

**Il n'existe pas de méthode ni d'appareillage universel pour la mesure du débit d'un cours d'eau.** Le choix d'une méthode est conditionné par divers facteurs [→ tableau comparatif Annexe B]. On peut citer en particulier :

- la configuration du site et les conditions d'écoulement ;
- le matériel de mesure et le temps disponibles ;
- le nombre de personnes pouvant participer à la mesure ;
- l'exactitude que l'on souhaite obtenir.

On peut toutefois donner les conseils généraux suivants pour l'application adaptée des différentes méthodes de jaugeage présentées dans ce guide :

- **la méthode par capacité** est la plus simple, la plus rapide, la moins coûteuse, et une des plus exactes. Elle ne peut malheureusement être utilisée que pour de faibles débits en présence d'une chute ou d'un bassin de géométrie simple pouvant être fermé ;
- **le jaugeage à l'aide d'un courantomètre** (mécanique, électro-magnétique, ou acoustique) donne généralement des résultats fiables mais la mise en œuvre est longue. Cette méthode ne s'applique qu'à des écoulements réguliers et pas trop profonds (< 1 m environ, selon la vitesse d'écoulement) ;
- **le jaugeage à l'aide d'un profileur acoustique à effet Doppler (ADCP)** est un peu plus rapide et donne également des résultats fiables dans les bonnes conditions d'application et de répétition. Cette technique est cependant à réserver à des écoulements réguliers, peu agités, et suffisamment larges et profonds (> 40 - 50 cm environ pour les appareils les mieux adaptés aux petites sections). Le matériel est coûteux et la maîtrise de la mesure demande une certaine expertise ;

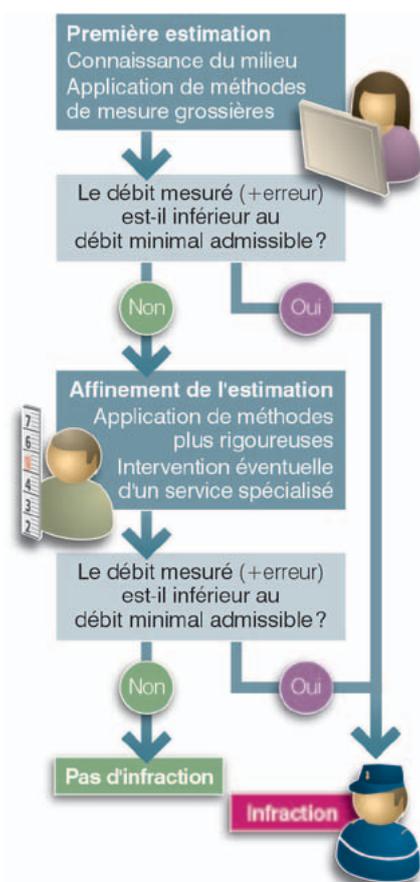


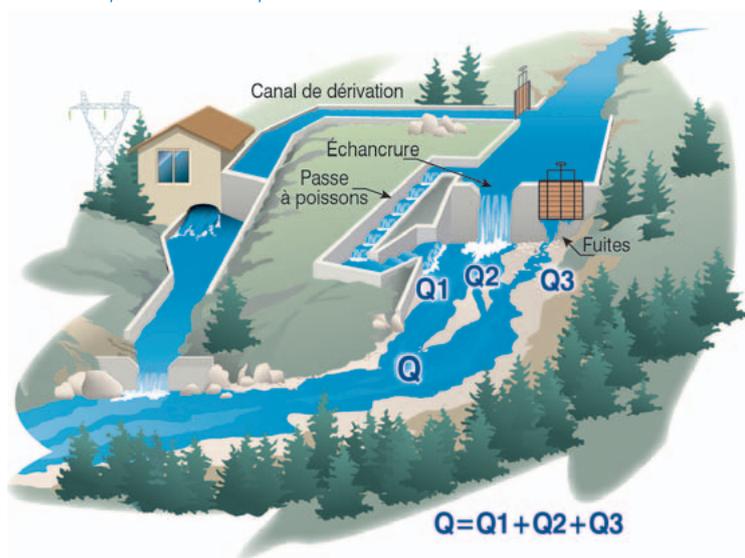
Fig. 2.1 - Critère de choix d'une méthode pour la mesure du débit d'un cours d'eau, dans le cadre d'un contrôle de débit réglementaire.

- **une évaluation du débit à l'aide de flotteurs**, même dans les conditions idéales d'application, reste une estimation indicative plus qu'une mesure. Elle peut être utile pour confirmer l'ordre de grandeur du débit, et décider de la suite à donner aux opérations de contrôle (mesures plus détaillées) ;
- **la méthode par dilution chimique** s'avère la mieux adaptée, voire la seule possible dans de nombreux cas d'écoulements agités, notamment dans le cas des passes à poissons. De mise en œuvre simplifiée grâce aux capteurs-enregistreurs (conductimètres, fluorimètres), elle est une des méthodes les plus exactes à condition que le bon mélange du traceur soit assuré. En cas de perte ou rétention de traceur, l'erreur de mesure ne peut conduire qu'à la surestimation du débit mesuré<sup>4</sup> ;
- enfin, le recours à **une loi d'ouvrage hydraulique** ne peut donner de résultat correct qu'en présence d'un dispositif hydraulique au fonctionnement proche des cas théoriques. Une attention particulière doit être portée sur les conditions d'approche (vitesses faibles), de chute (fonctionnement dénoyé/noyé) et de géométrie de l'ouvrage (épaisseur, caractéristiques de l'échancrure ou de l'orifice).

### 2.3.2.3 Conseils et recommandations valables pour toutes les méthodes

Ne pas hésiter à **se déplacer vers l'aval** (même de plusieurs centaines de mètres si nécessaire) pour **trouver un bief ou une section de mesure ayant des caractéristiques se rapprochant au mieux de celles recommandées pour l'application de la méthode choisie** (prendre soin dans ce cas de vérifier qu'il n'y ait ni pertes et ni apports entre l'endroit où le débit doit être évalué et le site de mesure finalement choisi, ou alors, les prendre en compte dans le résultat final).

Fig. 2.2 - Exemple de configuration d'aménagement hydraulique avec plusieurs débits partiels.



**Le niveau du plan d'eau, et donc le débit, ne doit pas varier significativement pendant les mesures.** Pour le vérifier, il faut donc, lorsque le temps de mesure est long<sup>5</sup>, repérer le niveau avant et après les mesures (photo, marquage, etc.).

Dans certains cas, on peut être amené à considérer la section transversale du cours d'eau comme étant constituée de plusieurs éléments juxtaposés, sur lesquels on pourra mesurer indépendamment des débits partiels, par des méthodes pouvant éventuellement être différentes. Le débit total sera alors égal à la somme des débits partiels obtenus sur chaque élément de section [→ fig. 2.2].

Il est parfois utile, avant de commencer les mesures, d'**effectuer quelques petits travaux d'aménagement du site** afin que ses caractéristiques se rapprochent le plus possible de celles du site idéal correspondant à la méthode choisie.

Pour améliorer la validité d'un résultat de jaugeage et ainsi favoriser sa reconnaissance notamment au niveau juridique, on peut émettre les conseils suivants :

- respect des recommandations énoncées pour l'application de la méthode choisie ;
- répétition des mesures et/ou mise en œuvre, lorsque cela est possible, de méthodes différentes pour comparer les résultats ;

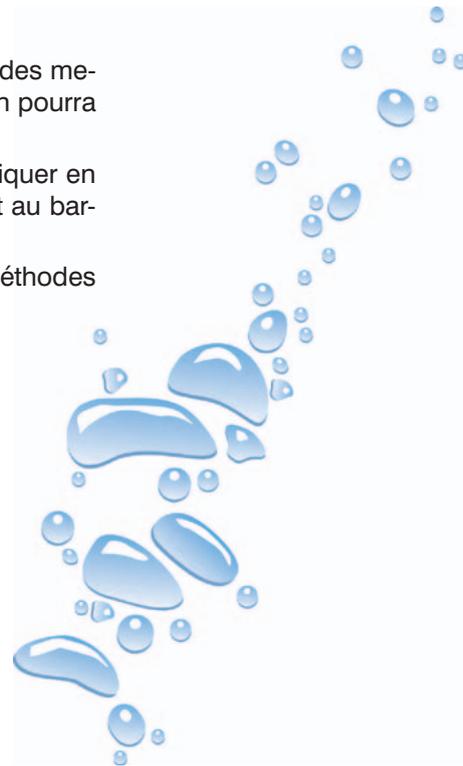
4 - Lorsque la condition de bon mélange n'est pas respectée, l'erreur de mesure peut conduire aussi bien à une sous-estimation qu'à une surestimation du débit mesuré.

5 - Certains jaugeages au courantomètre, par exemple, peuvent durer plus d'une heure.

- relevé d'un maximum d'éléments concernant les conditions de réalisation de la mesure et des dépouillements (détails sur les différentes étapes, consignation des mesures intermédiaires, etc.), ce qui permettra de pouvoir vérifier les calculs *a posteriori* et éventuellement de les faire valider par des organismes spécialisés ;
- repérages (section de mesure, niveau d'eau, position des ouvrages, etc.) à l'aide d'un appareil photographique (datation automatique des photos) et/ou par marquage indélébile discret (bombe de peinture, par exemple) ;
- évaluation des incertitudes et justification du calcul.

Des modèles de fiches de terrain pour le relevé des observations et des mesures sont proposés en Annexe E. Pour chaque contrôle de débit, on pourra remplir deux types de fiche :

- une fiche de renseignements généraux sur le site de mesure ; indiquer en particulier la situation du ou des biefs de mesure choisis par rapport au barrage ;
- une ou plusieurs fiches de mesure correspondant à la ou les méthodes choisies.



## 2.4 Incertitudes de mesure

### 2.4.1 Erreurs et incertitudes

#### 2.4.1.1 Pas de mesure sans erreur de mesure

L'erreur est la différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie de la grandeur que l'on cherche à déterminer (ou « mesurande »). 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, bon mélange du traceur, variation linéaire des vitesses entre verticales de mesure, dispositif 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, 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.

### 2.4.1.2 Erreurs systématiques et erreurs aléatoires

On peut distinguer deux types d'erreur<sup>6</sup> [→ fig. 2.3] : les erreurs systématiques (dus au réglage de l'appareil de mesure, à la procédure de calcul, etc.) et les erreurs aléatoires (manque de sensibilité de l'appareil de mesure, résolution de la lecture, fluctuations naturelles de la grandeur à mesurer, etc.).

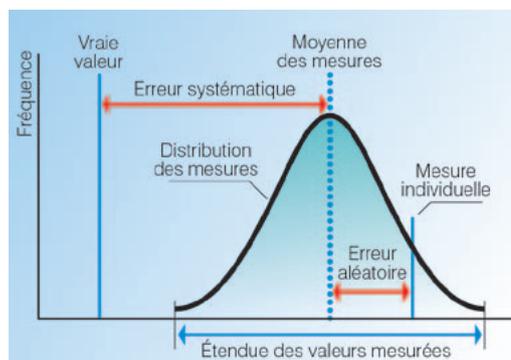


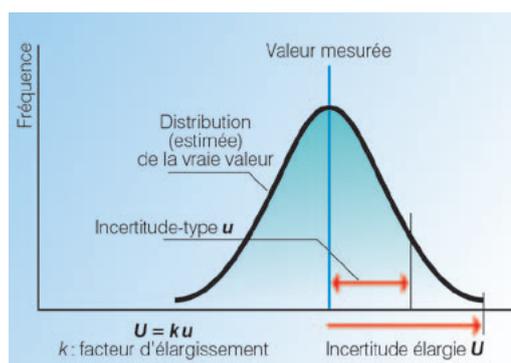
Fig. 2.3 - Notion d'erreur de mesure : distribution des mesures par rapport à la vraie valeur ( ).

**Les erreurs systématiques ne sont pas réduites par la répétition des mesures.** Les erreurs systématiques sont réduites en appliquant des corrections, lesquelles sont déterminées par des mesures complémentaires telles que des étalonnages, etc. L'application concurrente de différents appareils ou de différentes méthodes à la mesure d'un même débit permet de mettre en évidence certaines erreurs systématiques liées à un appareil ou à une méthode en particulier. C'est un moyen efficace de confirmer la validité d'une mesure de débit conduisant au constat d'une infraction.

**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 quatre 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 entre le gain de précision et le temps passé.

### 2.4.1.3 Notion d'incertitude de mesure

Fig. 2.4 - Notion d'incertitude de mesure : distribution estimée de la vraie valeur (inconnue) autour de la valeur mesurée.



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. 2.4). Cette analyse suit un formalisme mathématique, mais elle comporte inévitablement des choix justifiés par l'expérience et le sens physique de l'hydromètre. **Mieux vaut une estimation même grossière (mais argumentée) de l'incertitude de mesure, que pas d'estimation du tout !** Pour plus de détails sur l'analyse des incertitudes, se reporter au *Guide pour l'expression des incertitudes de mesure* ou GUM [NF ENV 13005, 1999]. Cette méthodologie, établie par différents organismes métrologiques internationaux et publiée par l'ISO, fait référence et sera suivie dans cet ouvrage.

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 [NF ENV 13005, 1999] 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 [NF ENV 13005, 1999] est donc identique.

6 - Terminologie : éviter les termes « biais » (bias en anglais) et « précision » (precision en anglais), qui renvoient à des méthodologies d'analyse des incertitudes non conformes au GUM (NF ENV 13005, 1999). De même, le terme « erreur » ne doit pas servir à désigner une incertitude, et les termes « systématique » et « aléatoire » qualifient une erreur ou un effet, en aucun cas une incertitude.

## 2.4.2 Calcul des incertitudes

### 2.4.2.1 Incertitude-type et facteur d'élargissement

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. 2.4]. 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 [→ fig. 2.4], on multiplie l'incertitude-type par un facteur d'élargissement  $k$  correspondant à un certain niveau de confiance <sup>7</sup> :

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

L'élargissement  $k = 2$  (niveau de confiance à 95 %) est le plus couramment retenu en hydrométrie.

### 2.4.2.2 Évaluation 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) :

$$u'_X = \frac{u_X}{X} \text{ (en \%)}$$

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 évaluée à partir d'essais statistiques, comme des essais de laboratoire ou de terrain, en conditions contrôlées : on parle alors de méthode d'estimation des incertitudes de type A. L'incertitude-type peut aussi être évaluée à partir d'autres sources d'information (de méthode d'estimation de 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 [→ fig. 2.5].

On supposera **une loi rectangulaire** pour une grandeur dont la valeur est bornée sur un intervalle connu et a une probabilité égale de se situer en tout point de l'intervalle. C'est typiquement le cas d'une incertitude de résolution liée à la lecture d'un afficheur par exemple. Connaissant ou estimant l'écart maximal (ou amplitude de variation maximale)  $e_X$  lié à la grandeur  $X$ , l'incertitude-type correspondante vaudra  $u_X = e_X / (2\sqrt{3})$ . Cette évaluation de l'incertitude pourra être appliquée lorsqu'on dispose d'un faible nombre (< 6 typiquement) de mesures indépendantes  $X_i$  répétées dans des conditions identiques. Par précaution, on considère alors  $e_X = 2 [\max(X_i) - \min(X_i)]$ , et il vient :

$$u_X = \frac{\max(X_i) - \min(X_i)}{\sqrt{3}}$$

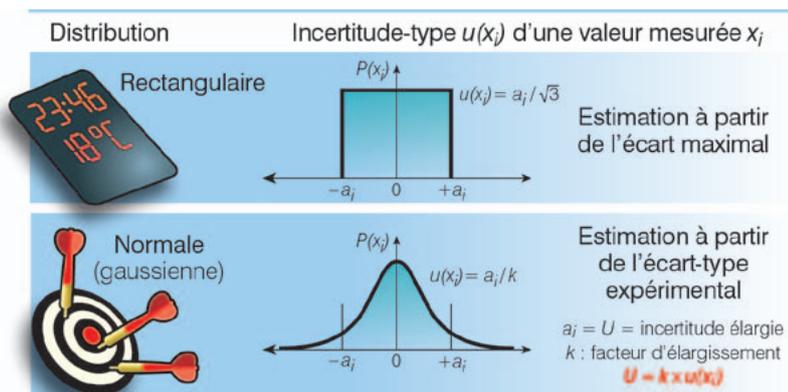


Fig. 2.5 - Lois de distribution usuelles pour les incertitudes-types élémentaires.

<sup>7</sup> - Ces valeurs de niveau de confiance correspondent à une distribution normale. Elles sont par défaut considérées comme pertinentes, en s'appuyant sur le Théorème Central Limite, qui indique que la combinaison linéaire de lois de distributions quelconques tend vers une loi gaussienne.

On choisira une **loi normale** (ou gaussienne) lorsque l'on suppose que la grandeur suit une distribution aléatoire centrée sur la valeur moyenne mesurée. Dans ce cas, l'incertitude-type  $u_x$  pourra être directement évaluée par l'écart-type expérimental calculé sur une série d'au moins six mesures indépendantes  $X_i$  répétées dans des conditions identiques. Étant donné qu'on évalue alors la moyenne  $\mu_x$  et l'écart-type expérimentaux à partir d'un échantillon de la population, on utilisera l'écart-type expérimental corrigé  $\sigma_x$  :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)^2}$$

L'écart-type expérimental corrigé peut être calculé simplement à l'aide de tableurs (fonction ECARTYPE ou STDEV dans *OpenOffice.org CALC* ou dans *MS Office EXCEL*).

Alternativement, toujours en supposant une loi normale, on pourra évaluer l'écart maximal à la moyenne, pour un niveau de confiance de 95 % et le diviser par  $k = 2$  pour obtenir  $u_x$ .

#### 2.4.2.3 Calcul de l'incertitude combinée

À partir du modèle mathématique de la mesure, on combine toutes les incertitudes-types pour évaluer l'incertitude-type combinée  $u_Q$ , selon la formule de propagation des incertitudes. Pour en simplifier l'application, on ne présente pas cette formule mais les règles de calcul suivantes, permettant de traiter ou de comprendre la plupart des cas pratiques de ce guide.

Pour une **somme** (ou une différence) de mesures de grandeurs **indépendantes**, les carrés des incertitudes-types **absolues**  $u$  (en L/s ou en m<sup>3</sup>/s) s'ajoutent.

→ **Exemple** d'une somme de débits mesurés [→ cas illustré par la fig. 2.2]

Modèle mathématique de la mesure :  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

Combinaison des incertitudes-types :  $\rightarrow u_Q^2 = u_{Q1}^2 + u_{Q2}^2 + u_{Q3}^2$

Pour un **produit** (ou un quotient) de mesures de grandeurs **indépendantes**, les carrés des incertitudes-types **relatives**  $u'$  (en %) s'ajoutent.

→ **Exemple** d'un jaugeage par capacité

Modèle mathématique de la mesure :  $Q = Vol / T$

Combinaison des incertitudes-types :  $\rightarrow u'_Q{}^2 = u'_{Vol}{}^2 + u'_T{}^2$

Attention aux exposants des formules hydrauliques.

→ **Exemple** d'une loi de déversoir

Modèle mathématique de la mesure :  $Q = C b h^{1,5}$

Combinaison des incertitudes-types :  $\rightarrow u'_Q{}^2 = u'_C{}^2 + u'_b{}^2 + 1,5^2 \times u'_h{}^2$

La combinaison des incertitudes permet de quantifier le poids relatif de chaque incertitude élémentaire dans l'incertitude combinée.

Se référer aux méthodes de calcul et exemples proposés dans le *Guide pratique* pour chaque méthode de détermination du débit.



### 2.4.3 Expression de l'incertitude associée à une mesure de débit

Ce guide pratique n'a pas pour ambition de proposer des calculs d'incertitude complexes, qui seraient impraticables sans implémentation dans un logiciel de dépouillement, et qui font encore l'objet de recherches pour certaines méthodes de jaugeage. La base de l'estimation des incertitudes associées à un débit jaugé reste **l'expérience, le sens physique et la rigueur intellectuelle de l'hydromètre**. Cependant, la valeur d'incertitude annoncée doit être justifiée à l'aide d'arguments quantitatifs et objectifs, *a fortiori* dans le cadre d'un jaugeage de contrôle réglementaire. Pour chaque méthode de jaugeage présentée dans ce guide, une section située en fin de chapitre est donc dédiée à des outils simples permettant d'estimer et justifier les incertitudes sur le débit.

Tout d'abord, une méthode simple de calcul selon **la méthode de propagation des incertitudes** du GUM [NF ENV 13005, 1999] est présentée et détaillée à l'aide d'un exemple d'application numérique.

Outre ce type de calcul détaillé, **une méthode plus empirique d'estimation des incertitudes** est également proposée pour chaque méthode de jaugeage. En effet, en pratique pour certains jaugeages où les erreurs aléatoires dominent, une évaluation de la réitération par des mesures successives peut être représentative de l'incertitude. Pour d'autres méthodes, l'incertitude sur l'une des grandeurs mesurées peut être prépondérante sur l'incertitude combinée sur le débit, et donc son estimation peut suffire à donner une bonne idée de l'incertitude globale.

Enfin, pour chaque type de méthode sont indiquées les valeurs usuelles et les valeurs limites (approximatives) encadrant l'incertitude élargie globale  $U'_Q$  habituellement observée [→ tableau comparatif Annexe B]. À partir de ces renseignements et d'une appréciation des conditions particulières rencontrées, il conviendra, si possible, d'estimer la valeur probable de l'incertitude à prendre en compte lors de la présentation du résultat final. Dans le cas d'un contrôle de débit, et dans les bonnes conditions d'application, une valeur maximale de  $U'_Q$  par défaut est indiquée et pourra être retenue par précaution.

En pratique, on assortira la valeur de débit jaugée  $Q$  (en L/s ou m<sup>3</sup>/s) de l'incertitude élargie  $U_Q$  sous la formulation suivante, **en mentionnant toujours le facteur d'élargissement  $k = 2$ , et donc le niveau de confiance 95 %** :

$$Q \text{ L/s} \pm U_Q \text{ L/s (niveau de confiance 95 \% ; } k = 2)$$



[→ exemple page suivante]

### 2.4.4 Bonnes pratiques et incertitudes

Les bonnes pratiques permettent de réduire les incertitudes sur les débits. Elles facilitent aussi leur évaluation objective.

Il est en particulier recommandé de :

- déployer une instrumentation adaptée, en bon état, et si possible certifiée/étalonnée. Consigner ses caractéristiques ;
- choisir le bief de mesure ayant les meilleures caractéristiques pour l'application de la méthode choisie ; si nécessaire aménager le site ;
- contrôler le niveau de l'eau pendant tout le déroulement des mesures ;
- consigner toutes les étapes de l'intervention, prendre le maximum d'observations : photos, dessins, notes... ;
- se reporter à la documentation technique et méthodologique.

### → Exemple d'application numérique sur une somme de débits

Lors du stage de formation Onema/Cemagref 2010, un contrôle de débit est pratiqué sur une petite centrale hydro-électrique, pour des conditions hydrauliques vérifiées stables (niveaux et débits constants, pas de manœuvre d'ouvrage). L'aménagement comporte un barrage composé d'un seuil (chaussée large) et d'une échancrure, une passe à poisson (PAP), et un canal de dérivation. Le débit passant dans ces différents ouvrages est mesuré par une technique appropriée : application d'une loi hydraulique (seuil et échancrure), dilution (passe à poisson), courantomètre électro-magnétique et flotteurs (canal de dérivation). Le débit total de la rivière en amont de l'aménagement est mesuré par profileur acoustique à effet Doppler (ADCP), tandis que le débit du tronçon court-circuité (TCC) est mesuré par courantomètre acoustique à effet Doppler (ADV).

Ces différentes techniques font l'objet de différents chapitres de ce guide, ainsi que l'évaluation des incertitudes correspondantes. On résume ci-dessous les valeurs de débit obtenues, ainsi qu'une valeur d'incertitude élargie relative ( $U'Q$ , niveau de confiance 95 %,  $k = 2$ )

justifiée simplement :

$Q_{\text{seuil}} = 0,426 \text{ m}^3/\text{s} \pm 20 \%$	(valeur typique pour loi d'ouvrage)
$Q_{\text{échancrure}} = 1,28 \text{ m}^3/\text{s} \pm 20 \%$	(valeur typique pour loi d'ouvrage)
$Q_{\text{PAP}} = 0,194 \text{ m}^3/\text{s} \pm 3 \%$	(répétabilité de la dilution < 1 %, excellentes conditions d'application)
$Q_{\text{dérivation}} = 4,32 \text{ m}^3/\text{s} \pm 10 \%$	(6 verticales équivalentes à 10, car géométrie connue et vitesses régulières)
$Q_{\text{flotteurs}} = 4,24 \text{ m}^3/\text{s} \pm 30 \%$	(3 verticales à 3 flotteurs chacune, géométrie connue mais section étroite)
$Q_{\text{TCC}} = 2,02 \text{ m}^3/\text{s} \pm 6 \%$	(15 verticales)
$Q_{\text{total}} = 6,59 \text{ m}^3/\text{s} \pm 4 \%$	(répétabilité 2 % sur 11 traversées)

Le débit total peut être calculé comme la somme  $Q_1$  des débits à travers le seuil, l'échancrure, la passe à poisson et le canal de dérivation. Ce débit vaut  $Q_1 = 6,22 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit un écart de - 6 % par rapport à  $Q_{\text{total}}$ . L'incertitude sur la somme de débits  $Q_1$  se calcule comme suit, en se rappelant que les incertitudes-types  $u$  valent la moitié des incertitudes élargies ( $k = 2$ ) :

$$\begin{aligned} u_{Q_1}^2 &= u_{Q_{\text{seuil}}}^2 + u_{Q_{\text{échancrure}}}^2 + u_{Q_{\text{PAP}}}^2 + u_{Q_{\text{dérivation}}}^2 \\ &= (0,20 / 2 \times 0,426)^2 + (0,20 / 2 \times 1,28)^2 + (0,03 / 2 \times 0,194)^2 + (0,10 / 2 \times 4,32)^2 \\ &= 0,065 \end{aligned}$$

D'où,  $U_{Q_1} = 0,51 \text{ m}^3/\text{s}$  (niveau de confiance 95 %,  $k = 2$ ), soit 8 %.

Le débit total peut alternativement être calculé en utilisant le jaugeage du tronçon court-circuité, assorti d'une incertitude bien inférieure aux débits issus d'une loi hydraulique :

$Q_2 = Q_{\text{TCC}} + Q_{\text{dérivation}} = 6,34 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit un écart de - 4 % par rapport à  $Q_{\text{total}}$ . L'incertitude sur la somme de débits  $Q_2$  se calcule comme suit :

$$\begin{aligned} u_{Q_2}^2 &= u_{Q_{\text{TCC}}}^2 + u_{Q_{\text{dérivation}}}^2 \\ &= (0,06 / 2 \times 2,02)^2 + (0,10 / 2 \times 4,32)^2 \\ &= 0,050 \end{aligned}$$

D'où,  $U_{Q_2} = 0,45 \text{ m}^3/\text{s}$  (niveau de confiance 95 %,  $k = 2$ ), soit 7 %. L'incertitude sur la somme de débit est en fait à peine réduite, car la majeure partie du débit est mesurée dans le canal de dérivation, avec une incertitude de mesure inchangée.

Si on évalue cette fois le débit dans le canal de dérivation à l'aide de la mesure au flotteur, la somme  $Q_3 = Q_{\text{TCC}} + Q_{\text{flotteurs}} = 6,26 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit un écart de - 5 % par rapport à  $Q_{\text{total}}$ . L'incertitude sur la somme de débits  $Q_3$  se calcule comme suit :

$$\begin{aligned} u_{Q_3}^2 &= u_{Q_{\text{TCC}}}^2 + u_{Q_{\text{flotteurs}}}^2 \\ &= (0,06 / 2 \times 2,02)^2 + (0,30 / 2 \times 4,24)^2 \\ &= 0,408 \end{aligned}$$

D'où,  $U_{Q_3} = 1,28 \text{ m}^3/\text{s}$  (niveau de confiance 95 %,  $k = 2$ ), soit 20 %. Dans ce cas précis, l'incertitude résultante est manifestement surestimée, vu la cohérence de la mesure de débit par flotteurs avec les mesures concurrentes.

Cet exemple montre enfin que des mesures redondantes par des techniques différentes donnent plus de confiance dans l'exactitude des débits contrôlés.

## 2.5 Sécurité des opérateurs

Les travaux dans l'eau et au bord de l'eau doivent s'effectuer dans le respect de consignes de sécurité adaptées. En particulier [→ fig. 2.6] :

« Dans les travaux exposant au risque de chute dans l'eau, les personnes concernées doivent rester constamment visibles d'un autre membre du personnel »<sup>8</sup>.

### 2.5.1 Risques liés à une chute dans l'eau

- **La noyade** est un accident de type asphyxique aigu provoqué par l'inondation des voies respiratoires.
- **L'hypothermie** correspond à une baisse générale de la température du corps sous le seuil des 35 °C. Cette baisse de température peut être brutale dans le cas d'une immersion dans l'eau froide. Elle entraîne un affaiblissement et la fibrillation du cœur.
- **L'hydrocution** est un choc thermique dû à la différence de température entre le corps humain et l'eau dans laquelle il plonge, elle provoque un arrêt cardio-respiratoire.
- **La contamination** par des agents pathogènes : la vaccination contre la leptospirose et l'hépatite A est fortement recommandée<sup>9</sup>.



Romain Chazal, Onema

Fig. 2.6 - Exemple d'intervention en rivière nécessitant le port d'équipements de protection individuelle (gilet de sauvetage en particulier) et un contact visuel entre agents.

### 2.5.2 Consignes générales de sécurité

- Prévoir la présence d'un (ou plusieurs) sauveteur secouriste du travail lors des interventions dans l'eau.
- Veiller en permanence à votre sécurité et à celle de ceux qui vous accompagnent.
- Toujours être équipé d'un ou plusieurs téléphones portables (dans une pochette étanche si possible).
- Dans le cas de travaux en grands cours d'eau ou lacs, le responsable de la mission doit demander à chaque participant s'il sait nager.
- Être équipés de semelles anti-dérapantes et d'équipements de protection individuels (EPI) adaptés à vos travaux.
- Prévoir vêtements de rechange et serviette éponge.
- En cas d'utilisation de l'électricité en milieu humide, utiliser du matériel IP 67 (au moins) et détenir une habilitation électrique.

### 2.5.3 Interventions à pied dans les cours d'eau, lacs ou bassins

#### ■ Les cours d'eau naturels

Une montée naturelle des eaux peut être très rapide dans certains bassins versants et surprendre les opérateurs.

Avant de partir vous devez :

- vous renseigner sur les prévisions météo et les débits.

8 - Article 23 § 4 du règlement général des industries extractives institué par le décret n° 80-331 du 7 mai 1980. Les agents de l'Onema ne sont pas soumis à ce texte mais cette mesure doit être prise en compte dans les interventions et contrôles sur les ouvrages.

9 - Chapitre 3 « Risques professionnels » du calendrier vaccinal 2005 et recommandation du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) du 18 mars 2005.

Sur place vous devez :

- respecter les consignes générales de sécurité ;
- installer si possible un repère dans la zone de travail à surveiller pour se rendre compte d'une variation du niveau d'eau ;
- adopter le port du gilet de sauvetage ou EIF (équipements individuel de flottaison) ; une bouée reliée à une corde peut être nécessaire dans la zone de travail dans certaines conditions.

### ■ Les cours d'eau régulés

Un cours d'eau en aval d'un ouvrage hydroélectrique (barrage, centrale) présente toujours un risque potentiel. Les lâchers d'eau nécessaires à la production électrique peuvent à tout instant entraîner une rapide montée des eaux, recouvrant en quelques minutes les îles et les bancs de gravier. Même par beau temps, vous devez rester très prudent.

Avant de partir vous devez :

- vous renseigner sur les arrêtés préfectoraux et municipaux existants, qui réglementent l'accès à la rivière ;
- prévoir vos interventions à l'avance et prévenir les gestionnaires des ouvrages. EDF dans certains cas peut vous faire signer une « *Convention d'informations réciproques relative à vos travaux dans le cours d'eau* » ou simplement vous demander de prévenir différents services par fax. Dans tous les cas, ils demandent d'être joignable et de prévenir au début et à la fin des travaux ;
- en cas de contrôle sur ce type d'ouvrage, prévenir par fax juste avant l'intervention et envoyer un agent sur l'ouvrage de régulation pour s'assurer que le message a bien été enregistré. Cette procédure permet de faire le lien avec les agents qui interviennent sur le cours d'eau en cas de manœuvre d'ouvrage.

Sur place vous devez :

- respecter les consignes générales de sécurité ;
- installer un repère dans la zone de travail à surveiller pour se rendre compte d'une variation du niveau.

### ■ Les bassins

Vous devez :

- adopter le port du gilet de sauvetage (ou EIF), une chute dans un bassin pouvant avoir les mêmes conséquences qu'une chute dans un cours d'eau ;
- respecter les consignes générales de ce document ;
- en cas de contrôle sur les bassins d'une entreprise ou d'une collectivité (cas des stations de traitement des eaux, piscicultures...), respecter les consignes de sécurité et d'hygiène du site ;
- se méfier et toujours tester la solidité des garde-corps en place avant une intervention ;
- repérer, avant toute intervention, l'emplacement des bouées de sauvetage et des arrêts d'urgence (coups de poing) permettant de stopper le système d'apport d'air (bassin d'aération) ou le pont racleur (clarificateur).

Toute intervention spécifique risquée sur les bassins d'aération doit être réalisée après arrêt de l'aération si possible.



## 2.5.4 Interventions en bateau

Lors des interventions en bateau, vous devez :

- respecter les consignes générales de sécurité ;
- porter systématiquement des gilets de sauvetage (EIF), si possible à déclenchement automatique. Ils doivent être conformes à la réglementation et marqués CE. Ils doivent être vérifiés régulièrement. Le responsable de la mission doit en expliquer le fonctionnement à chaque participant ;
- respecter les consignes du pilote du bateau. Celui-ci doit être titulaire du permis fluvial ou côtier le cas échéant. Il doit veiller à la présence et au bon état du bateau et du matériel de sécurité obligatoire. C'est lui seul qui décide de la possibilité ou non de naviguer au vu des conditions météo et d'écoulement. Il doit donner des consignes aux participants et les responsabiliser. L'équipage doit être limité, organisé et doit comporter des personnes expérimentées ;
- surveiller la profondeur, les corps flottants, les remous et les autres embarcations ;
- veiller au bon arrimage du bateau et à ne détacher le bateau que si les moteurs sont en route ;
- préférer des bottes, chaussures ou combinaisons étanches aux salopettes de pêche (*waders*) et cuissardes qui ne permettent pas de nager efficacement ;
- en cas de chute d'un participant, couper les moteurs. L'« homme à la mer » doit déclencher son gilet, s'il n'est pas automatique, puis se laisser dériver vers une berge pour s'accrocher. La nage en eau vive est particulièrement fatigante.

## 2.5.5 Pour en savoir plus

- Institut national de recherche et de sécurité  
→ <http://www.inrs.fr>  
*Fiche pratique de sécurité Ed 119 « Équipements individuels de flottaison »*  
*Cahiers de notes documentaires ND 2104 « La sécurité du travailleur isolé : bilan. Démarche préventive et application dans le secteur des sablières »*
- Société internationale de sauvetage du Léman  
→ <http://www.sisl.ch>
- Consignes d'EDF  
→ [http://www.savoie-maurienne.com/sites/s\\_peche/edf/prudence\\_edf01.htm](http://www.savoie-maurienne.com/sites/s_peche/edf/prudence_edf01.htm)
- Transports Canada  
→ <http://www.tc.gc.ca/securitemaritime/>  
→ <http://www.tc.gc.ca/securitenautique/>
- Service interministériel régional des affaires civiles et économiques de défense et de la protection civile des Bouches-du-Rhône. Contenu de la formation BNSSA  
→ <http://sidpc.13.u-3mrs.fr/premiers.secoures/Sommaire-BNSSA.htm>

# Méthode par capacité

# 3

Cette méthode est appelée également « méthode volumétrique », ou encore, selon le type de capacité employée, « méthode par empotement » ou « méthode au seau ».

## 3.1 Principe de la méthode

La méthode consiste à mesurer le temps de remplissage (partiel ou total) d'un réservoir et le volume d'eau écoulé correspondant. Le résultat est obtenu immédiatement en utilisant la formule suivante qui est la définition même du débit :

$$Q = \frac{Vol}{T}$$

- $Q$  : débit [ $m^3/s$ ] ou [ $L/s$ ],
- $Vol$  : volume d'eau [ $m^3$ ] ou [ $L$ ] écoulé dans le réservoir,
- $T$  : temps [ $s$ ] de remplissage (partiel ou total) du réservoir.

En pratique, cette méthode s'appliquant plutôt aux faibles débits, le volume est exprimé habituellement en litre (L) et le débit en litre par seconde (L/s). Quand les conditions de sa mise en œuvre sont remplies, la méthode par capacité doit être employée en priorité. En effet, elle est la plus simple, la plus rapide, la moins coûteuse. De plus les incertitudes obtenues sont généralement réduites.

## 3.2 Mode opératoire

Le procédé le plus couramment employé consiste à mesurer le temps de remplissage d'un récipient introduit rapidement sous une chute d'eau, celle-ci constituant le débit que l'on veut connaître. La réalisation de la mesure implique donc l'existence d'une chute d'eau formant un jet de diamètre suffisamment réduit pour pouvoir être recueilli dans un récipient. Cette méthode ne nécessite aucun appareillage particulier ; il suffit de disposer d'un chronomètre et d'un récipient. Le type, le volume, la forme du récipient doivent être adaptés aux conditions particulières de mesure. On peut employer des types de récipient très divers tels que, par exemple, flacon, seau, bac, sac plastique, bidon, etc.

Au début de la mesure, le récipient est placé le plus rapidement possible sous la chute et le chronomètre est déclenché au même instant. Lorsqu'un volume d'eau suffisant est recueilli, le récipient est retiré également très rapidement et le chronomètre arrêté au même instant.

Le volume  $V_0$  peut être mesuré de deux manières :

- il représente le remplissage complet d'un récipient de volume connu. L'instant correspondant au débordement doit donc être déterminé avec le maximum de précision, mais les remous qui se produisent lors du remplissage ne facilitent pas la mesure ;
- le recueil de l'eau est arrêté avant remplissage complet du récipient, ceci afin d'éviter les difficultés signalées précédemment. Dans ce cas, le volume d'eau recueilli est déterminé *a posteriori*, différents procédés pouvant être employés (transvasement dans d'autres récipients de volume connu, calcul à partir de la hauteur d'eau mesurée dans le récipient si celui-ci a une forme géométrique définie, pesée, etc.).

Le temps d'écoulement  $T$  est mesuré à l'aide d'un chronomètre, en veillant à ce que les déclenchements de départ et de fin correspondent bien au début et à la fin du recueil du volume d'eau. Cette durée doit être suffisamment longue pour limiter les erreurs : au minimum cinq secondes et, si possible, au moins vingt secondes. Le volume du récipient doit être tel qu'il permette de recueillir au moins le volume d'eau s'écoulant pendant cette durée. La mesure du temps doit être répétée au moins trois fois. Si les résultats des trois mesures sont concordants, on peut prendre pour débit, la moyenne des trois valeurs. Sinon, recommencer la mesure jusqu'à l'obtention de trois résultats cohérents.

Ce procédé, qui nécessite l'utilisation d'une capacité transportable de volume forcément relativement réduit, est adapté surtout aux faibles débits.

### 3.3 Propositions d'aménagement des conditions de mesure

Pour faciliter la mesure et améliorer sa précision, on peut mettre en œuvre le procédé illustré ci-contre [→ fig. 3.1], qui remplace le déplacement du récipient (pouvant être difficile, voire impossible s'il est volumineux et plein d'eau) par la manipulation beaucoup plus aisée et rapide d'un dispositif de guidage du jet : gouttière, tube flexible, plaque, etc.

Lorsque l'on ne peut pas réaliser directement la mesure dans les conditions naturelles (pas de chute, écoulement trop étalé), il est parfois possible d'aménager temporairement le site de mesure pour pouvoir utiliser la méthode par capacité [→ fig. 3.2]. On peut par exemple édifier, à l'aide des matériaux disponibles sur le terrain (argile, cailloux, terre, etc.), un petit barrage dans lequel on introduit un tuyau ; ou encore installer une plaque déversante en travers de la rivière. Prendre soin de bien étanchéifier le dispositif à sa base et sur ses côtés et attendre la stabilisation du niveau de l'eau avant d'effectuer la mesure (vérifier le niveau, par exemple, à l'aide d'un régleur installé à l'amont de l'aménagement). S'assurer également que le relèvement artificiel du plan d'eau ne provoque pas, à l'amont, de dérivation d'une partie des eaux.



Fig. 3.1 - Exemple de dispositif de guidage du jet.

Fig. 3.2 - Exemples d'aménagements temporaires de la section de mesure.

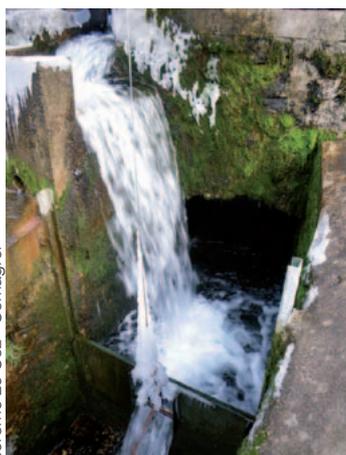




Fig. 3.3 - Plaque à orifice insérée pour le jaugeage capacitif.



a



b

Fig. 3.4 - Chute d'eau favorable au jaugeage capacitif (a). Exemple de réservoir de forme géométrique simple muni d'une vanne permettant une mesure du débit par jaugeage capacitif (b).

D'autres situations de mesure adaptées à la méthode capacitive sont illustrées ici [→ fig. 3.3 et 3.4a].

Dans certains cas d'aménagements hydrauliques pour lesquels l'écoulement s'effectue par déversement libre dans un réservoir de forme géométrique connue [→ fig. 3.4b], il est possible d'obtenir le débit en mesurant la variation, pendant un temps donné, du volume d'eau dans ce réservoir. Par exemple, ce procédé peut être employé lorsque le déversement se produit dans un chenal à parois latérales parallèles limité à l'aval par une vanne mobile. En fermant la vanne, on provoque la montée du niveau d'eau dans le chenal. À partir de la surface du plan d'eau dans le chenal et de la variation de niveau, on peut déterminer la variation du volume d'eau.

→ Attention : le niveau d'eau dans le réservoir doit être tel que le déversement puisse toujours s'effectuer librement, sinon la mesure est faussée à cause de l'influence de l'obstacle aval.

## 3.4 Calcul d'incertitude

### 3.4.1 Calcul détaillé

→ Se référer à la section 2.4 pour les notations et principes du calcul d'incertitude.

Les mesures du volume  $Vol$  et du temps  $T$  étant considérées indépendantes, l'application de la méthode GUM [NF ENV 13005, 1999] de propagation des incertitudes donne :

$$Q = Vol / T \rightarrow u'_Q{}^2 = u'_{Vol}{}^2 + u'_T{}^2$$

→ **Exemple de calcul d'incertitude sur un jaugeage par capacité** (calcul détaillé)

On remplit un récipient bien taré à 100 litres en 30 s mesurées au chronomètre. Dans de bonnes conditions de lecture du niveau, l'incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) sur le volume est estimée à 4 litres, soit  $U'_{Vol} = 4\%$ . Ainsi,  $u'_{Vol} = 2\%$ .

L'incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) sur le temps de remplissage est estimée à 1 s, soit environ 3 %. Ainsi,  $u'_T = 1,5\%$ .

L'incertitude-type combinée sur le débit est obtenue par :

$$u'_Q{}^2 = 2^2 + 1,5^2 = 6,25 \rightarrow u'_Q = 2,5\%$$

Au final, on obtient une incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) sur le débit arrondie à  $U'_Q = 5\%$ .

On exprime le résultat comme suit :

$$Q = 3,3 \text{ L/s} \pm 0,2 \text{ L/s (niveau de confiance à 95 \%, } k = 2).$$

### 3.4.2 Estimation rapide

En pratique, la réitération est très représentative de l'incertitude sur un débit jaugé par méthode capacitive, car les erreurs aléatoires dominent. Une estimation rapide de l'incertitude consiste donc à répéter la mesure au moins trois fois de suite, soit  $n \geq 3$  mesures successives  $Q_i$ , pour un écoulement à débit stable et dans les mêmes conditions de mesure.

Les formules suivantes peuvent alors être appliquées [→ explications section 2.4.2.2] :

- Si  $n \geq 6$ , prendre :

$$u'_Q = \frac{\text{écart-type}(Q_i)}{\text{moyenne}(Q_i)}$$

- Si  $n < 6$ , on considère une loi de distribution rectangulaire [→ fGUM ISO], ce qui implique :

$$u'_Q = \frac{\max(Q_i) - \min(Q_i)}{\sqrt{3} \text{ moyenne}(Q_i)}$$

### → Exemple de calcul d'incertitude sur un jaugeage par capacité (estimation rapide)

On reprend l'exemple d'un récipient taré à 100 litres avec lequel sont réalisés six remplissages mesurés au chronomètre. Les résultats sont présentés dans la feuille de terrain reproduite Fig. 3.5, selon le modèle proposé en Annexe E.

Les six mesures de débit obtenues sont  $Q_1 = 3,45$  L/s,  $Q_2 = 3,23$  L/s,  $Q_3 = 3,33$  L/s,  $Q_4 = 3,70$  L/s,  $Q_5 = 3,33$  L/s,  $Q_6 = 3,03$  L/s. La moyenne des débits vaut 3,35 L/s et l'écart-type expérimental 0,22 L/s.

La formule pour un nombre de mesures successives supérieur ou égal à 6 donne :

$$u'_Q = 0,22 / 3,35 = 0,07, \text{ soit } 7 \%$$

L'incertitude élargie finale (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) correspondante vaut :

$$U'_Q = 2 \times u'_Q = 14 \%, \text{ soit } U_Q = 0,47 \text{ L/s.}$$

On exprime le résultat comme suit :

$$Q = 3,35 \text{ L/s} \pm 0,47 \text{ L/s (niveau de confiance à 95 \%, } k = 2)$$

En réalité, les trois derniers remplissages n'ont pas été effectués avec soin, tandis que des manœuvres de vanne avaient lieu en amont. Si l'on se limite à la première série de trois mesures réalisées dans de bonnes conditions (moyenne des débits 3,34 L/s), la formule pour un nombre de mesures successives inférieur à 6 donne :

$$u'_Q = (3,45 - 3,23) / \sqrt{3} / 3,34 = 0,04, \text{ soit } 4 \%$$

L'incertitude élargie finale (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) se réduit alors à :

$$U'_Q = 2 \times u'_Q = 8 \%, \text{ soit } U_Q = 0,27 \text{ L/s.}$$

On exprime le résultat comme suit :

$$Q = 3,34 \text{ L/s} \pm 0,27 \text{ L/s (niveau de confiance à 95 \%, } k = 2)$$

Jaugeage par capacité				
Nom du cours d'eau : DELTA R504		Date : 01/04/2010		
Heure UTC, début : 08:00		Heure UTC, fin : 08:45		
Hauteur échelle début :		Hauteur échelle fin :		
Matériel de mesure : Ecoule		Opérateurs : BC, DB		
Volume du récipient : 100L				
Heure	Volume (L)	Temps de remplissage (s)	Débit (L/s)	Observations
08:00	100	29	3,4	
08:01	100	31	3,2	
08:03	100	30	3,3	
Moyenne des débits			3,5	
Écart type			0,22	
Écart type / Moyenne			0,06	
Heure	Volume (L)	Temps de remplissage (s)	Débit (L/s)	Observations
08:04	100	27	3,7	Manœuvres de vanne en amont
08:06	100	30	3,3	
08:07	100	33	3,0	
Moyenne des débits			3,5	
Écart type			0,4	
Écart type / Moyenne			0,1	

Figure 3.5. Exemple de fiche de terrain remplie pour six jaugeages par capacité successifs.

### 3.4.3 Valeurs usuelles

On retiendra les valeurs suivantes, usuellement rencontrées pour l'incertitude élargie relative  $U'_Q$  (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) :

- 5 % ou moins dans les bonnes conditions d'application : volume de la capacité déterminé rigoureusement, niveau stable et bien lisible, chronomètre relevé précisément, et surtout durée de remplissage la plus longue possible (au moins vingt secondes) ;
- 10 % dans des conditions moins favorables.

Dans le cas d'un contrôle de débit, et dans les bonnes conditions d'application, on retiendra une valeur maximale de  $U'_Q = 10$  %.

Les valeurs usuelles et limites de l'incertitude élargie  $U'_Q$  sont résumées dans le tableau comparatif Annexe B pour chaque méthode de jaugeage.

# Exploration du champ des vitesses

## Les courantomètres

# 4

### 4.1 Principe des méthodes par exploration du champ des vitesses

Le débit est égal au produit de la vitesse moyenne  $V_m$  de l'écoulement par la surface  $S$  de la section mouillée [→ fig.4.1] :

$$Q = V_m \times S$$

- $Q$  : débit [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $V_m$  : vitesse moyenne de l'écoulement [ $\text{m/s}$ ] perpendiculaire à la section de mesure
- $S$  : surface de la section mouillée [ $\text{m}^2$ ]

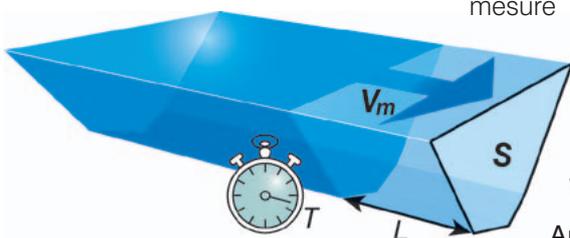


Fig. 4.1 - Principe du jaugeage par exploration des vitesses.

Cette formule se déduit simplement de la définition du débit [→ § 2.1.1.1]  $Q = Vol/T$ . Or, avec  $L$  la distance moyenne parcourue par l'eau pendant le temps  $T$ , le volume  $Vol$  s'exprime comme  $Vol = L \times S$ . Alors, le débit peut s'écrire :  $Q = (L \times S)/T = (L/T) \times S$ .

Autrement dit,  $L/T$  représentant la vitesse moyenne  $V_m$  de l'écoulement traversant la section considérée :  $Q = V_m \times S$ .

La vitesse de l'écoulement n'est pas uniforme sur la section transversale d'un cours d'eau. Il est donc nécessaire d'explorer le champ des vitesses en réalisant des mesures en plusieurs points de la section, généralement situés le long de verticales judicieusement réparties sur la largeur de la rivière.

À partir de ces relevés ponctuels, on détermine sur chacune des verticales, une vitesse moyenne qui est considérée comme représentative de la vitesse de l'écoulement sur un élément de la section mouillée.

Celle-ci étant ainsi découpée en plusieurs éléments juxtaposés, le débit total est obtenu en effectuant la somme, sur toute la largeur de la rivière, des produits de la vitesse moyenne de l'écoulement par la surface de l'élément de section correspondant.

Les mesures de vitesse de l'écoulement peuvent être réalisées avec différents types de matériels, les plus couramment employés étant les courantomètres et les flotteurs.

## 4.2 Matériel

Un courantomètre (ou vélocimètre) est un appareil de mesure permettant de déterminer la vitesse en un point de l'écoulement. Le principe de mesure d'un courantomètre peut être mécanique (on parle alors d'« hélice » ou de « moulinet »), électro-magnétique ou acoustique à effet Doppler (ADV, ADC). Pour le jaugeage à pied, il est généralement monté sur une perche graduée et déployé sur des verticales réparties en travers de la section de mesure.

### 4.2.1 Courantomètres mécaniques (moulinets)

Le moulinet est composé d'un élément fixe appelé « corps du moulinet » comportant un axe horizontal <sup>1</sup> sur lequel tourne une hélice [→ fig. 4.2]. La rotation de l'hélice produit des signaux électriques (impulsions) qui sont détectés et comptabilisés par un dispositif électronique que l'on connecte au corps du moulinet. Lors des mesures, le corps du moulinet doit être monté sur un support.

#### ■ Principe physique

Le moulinet étant immergé dans le cours d'eau, **l'hélice pointée vers l'amont de l'écoulement**, la vitesse de rotation de l'hélice est liée, par une relation connue, à la vitesse locale de l'écoulement <sup>2</sup>. Une hélice est caractérisée par son diamètre et son pas hydraulique. Le pas hydraulique est la distance parcourue par l'eau pour générer un tour d'hélice. La relation entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de rotation de l'hélice est appelée « courbe d'étalonnage » de l'hélice. Pour une gamme de vitesse déterminée, la courbe d'étalonnage est sensiblement linéaire.

Pour une hélice donnée, on aura donc une ou plusieurs droites d'équation de la forme suivante :

$$v = a_h \times n_t + b_h$$

- $v$  : vitesse du courant [m/s]
- $a_h$  : pas hydraulique de l'hélice [m]
- $n_t$  : nombre de tours d'hélice par seconde
- $b_h$  : vitesse dite de frottement ou vitesse de démarrage [m/s]

Les coefficients  $a_h$  et  $b_h$  sont déterminés expérimentalement pour chaque appareil. Les constructeurs livrent leurs appareils avec un certificat d'étalonnage sur lequel figure la ou les équations à utiliser pour calculer la vitesse. Il convient de vérifier régulièrement <sup>3</sup> cette courbe d'étalonnage par des essais en canal sur chariot tracté, selon la norme ISO 3455 (*Hydrométrie - Étalonnage des moulinets en bassins découverts rectilignes*).

#### → Exemple de formules d'étalonnage pour moulinet type C2 n° 10.150

Hélice n° 1-71605

$n_t < 1,86$

$$v = 0,0615 \times n_t + 0,012$$

$1,86 < n_t < 6,57$

$$v = 0,0572 \times n_t + 0,020$$

Hélice n° 3-71651

$n_t < 0,61$

$$v = 0,2301 \times n_t + 0,016$$

Chaque hélice doit être utilisée dans la gamme de vitesse pour laquelle elle est prévue. Il faut donc s'assurer que la vitesse de l'écoulement est comprise dans les limites indiquées par le constructeur. En particulier, cette vitesse doit être suffisante pour faire tourner l'hélice dans de bonnes conditions (la vitesse



1 - Les courantomètres mécaniques généralement utilisés en Europe sont des moulinets à hélice à axe horizontal. Les moulinets à coupelles à axe vertical souvent utilisés en Amérique du Nord ne sont pas présentés ici.

2 - Remarque : un moulinet ne donne pas une vitesse en un point au sens strict, mais une vitesse moyenne sur la surface circulaire balayée par l'hélice dans sa rotation.

3 - Toutefois, certaines équipes utilisent en consommable des hélices en plastique (plutôt peu adaptées aux conditions de contrôle de débit, courantomètres C31 et C20 de Ott) en suivant une courbe d'étalonnage moyenne fournie par le constructeur pour un montage donné. Une fois cassée, détériorée ou trop vieille, l'hélice est remplacée par une neuve.



Fig. 4.2 - Exemple de montage d'un courantomètre mécanique (moulinet).

minimale conseillée doit être au moins égale à deux fois la vitesse de démarrage du moulinet).

On distingue deux types d'hélice :

- les hélices dites « normales » qui donnent des résultats corrects de vitesse pour des angles d'incidence<sup>4</sup> faibles (inférieurs à 5 degrés) ;
- les hélices « autocomposantes » qui donnent, avec une bonne approximation et sans correction, la valeur de la vitesse pour des angles d'incidence importants (pouvant atteindre 30 à 45 degrés suivant les modèles). Si l'on ne peut choisir une section perpendiculaire au courant, le mieux est donc d'utiliser une hélice autocomposante. Cependant, l'angle d'incidence ne doit jamais être supérieur à la valeur indiquée par le constructeur.

Avec les moulinets couramment employés, la rotation de l'hélice génère des signaux électriques par des contacts mécaniques ou magnétiques. Les impulsions sont détectées et comptabilisées par un compteur électronique que l'on connecte sur le corps du moulinet. Habituellement, le compteur permet de présélectionner, soit le nombre d'impulsions à mesurer, soit le temps pendant lequel doit durer la mesure. La fréquence de rotation (nombre de tours par seconde) de l'hélice doit rester inférieure à la capacité de fonctionnement correct du compteur indiquée par le constructeur.

#### ■ Entretien et vérifications

Pour le transport et stockage du courantomètre, utiliser la boîte de protection prévue à cet effet.

Pour le compteur d'impulsions, employer des piles en bon état (prévoir en réserve un jeu de piles neuves) et stocker l'appareil sans les piles.

Pendant les mesures, le courantomètre doit être régulièrement sorti de l'eau pour être examiné, généralement à chaque changement de verticale.

Après chaque usage, effectuer un nettoyage (sans essuyage risquant de provoquer rayures et poussières) des différents éléments composant le moulinet (notamment paliers et axe) en utilisant son huile ou éventuellement de l'essence (certains moulinets fonctionnent sans huile). Dans le cas où les roulements nécessitent une lubrification, l'huile usagée sera changée après chaque jaugeage et les pièces en mouvement seront lubrifiées en utilisant l'huile préconisée par le constructeur. Remplacer toute pièce usée ou endommagée.

4 - Angle entre l'axe de l'hélice et la direction du courant.

Le bon fonctionnement d'un moulinet peut être vérifié par des contrôles à faire avant et après chaque jaugeage :

- vérifier la libre rotation de l'hélice : observer le ralentissement de l'hélice lancée à une certaine vitesse ; l'arrêt ne doit pas être brutal (un moulinet en bon état tourne sous l'action d'un courant d'air très faible, par exemple, en soufflant sur l'hélice parallèlement à l'axe) ;
- vérifier la non déformation de l'hélice et de l'axe ;
- contrôler les signaux : faire tourner lentement l'hélice en comptant les tours et comparer avec le nombre de tours indiqué par le compteur ;
- vérifier le bon fonctionnement du compteur (horloge notamment).

Un protocole de *contrôle de l'équipage mobile* a été défini par les équipes d'EDF-DTG [Note technique Perret, 1992]. Il consiste à lancer des rotations d'hélices à l'air libre et à suivre, avec deux compteurs, la vitesse de lancement et le nombre d'impulsions avant l'arrêt de l'hélice.

Autres préconisations pour les moulinets :

- la fréquence du remplacement de l'huile<sup>5</sup> dépend de la fréquence d'utilisation : une fois par mois dans le cas des usages très réguliers, moins souvent si l'usage est moins fréquent ;
- nettoyage de l'axe et des roulements après chaque série de mesure ou après une semaine de déplacement ;
- contrôle de l'équipage mobile deux fois par an ou en cas de doute sur le matériel ;
- étalonnage en laboratoire tous les deux à trois ans<sup>6</sup> (sauf cas de chocs), suivant l'entretien du matériel et la fréquence d'utilisation.

## 4.2.2 Courantomètres électro-magnétiques

Comme l'ensemble moulinet à hélice et compteur d'impulsions, le courantomètre électro-magnétique [→ fig. 4.3] peut être employé pour mesurer la vitesse de l'eau en exploration points par points à l'aide d'une perche graduée. La durée des moyennes de vitesse (temps d'exposition) est paramétrable et l'affichage digital permet la lecture directe de la vitesse. Ce type d'instrument est largement employé dans le domaine de l'assainissement urbain et en rivière [→ exemples répertoriés dans le tabl. 4.1].

### ■ Principe physique

Le capteur crée un champ magnétique entre deux électrodes situées à l'extrémité de la sonde. La vitesse est calculée en application de la Loi de Faraday, c'est-à-dire par la mesure d'une Force ÉlectroMotrice (FEM) générée par le passage de l'eau à travers le champ magnétique et directement proportionnelle à la vitesse d'écoulement.

### ■ Avantages

- Pas de pièces en mouvement (faibles risques de détérioration et entretien réduit) ;
- indication directe de la vitesse de l'écoulement ;
- gamme étendue de vitesses mesurables ;
- mesures possibles en présence de végétation aquatique.



Guillaume Dramais - Cemagref



Guillaume Dramais - Cemagref



Guillaume Dramais - Cemagref

Fig. 4.3 - Exemples de montage d'un courantomètre électro-magnétique.

5 - Le problème est la dilution de l'huile par l'eau de la rivière.

6 - Certains systèmes qualité peuvent imposer un étalonnage plus fréquent.

### ■ Inconvénients

- Minimum de conductivité électrique de l'eau indispensable ;
- éviter l'utilisation à proximité de masses métalliques ;
- la formation d'un film gras sur la sonde peut compromettre les mesures. Les électrodes doivent être propres : reportez-vous aux notices d'utilisation pour nettoyer correctement votre matériel.

Tabl. 4.1 - Exemples de courantomètres électro-magnétiques connus sur le marché français.

Marque	Type	Gamme de vitesse	Avantage	Inconvénient
Ott	Nautilus	0 à 2,5 m/s	Perche universelle Ott	Encombrement de la sonde
Marsh Mac Birney	Flomate 2000	- 0,15 à 6 m/s	Taille de la sonde	
Valeport	BFM 801	- 5 à 5 m/s	Prix	Perche sans vernier

### ■ Entretien et vérifications

Même si l'étalonnage régulier des courantomètres électromagnétiques n'est pas indispensable, une vérification en laboratoire d'étalonnage est recommandée tous les deux à trois ans.

Le zéro de certains courantomètres peut être contrôlé et réglé (cas du *Flomate 2000* par exemple). Le principe consiste à immerger la sonde dans une eau stagnante, par exemple dans un seau, de façon qu'elle soit éloignée de 7 à 8 cm des parois. Ensuite il faut attendre une dizaine de minutes que l'eau ne soit plus en mouvement avant de procéder au réglage. *Ott* déconseille la vérification du zéro dans un récipient de petite dimension (seau), et le zéro ne peut pas être réglé sur son courantomètre *Nautilus*.

## 4.2.3 Courantomètres acoustiques à effet Doppler

Les courantomètres acoustiques (ADV, ADC) sur perche [→ fig. 4.4] sont depuis peu utilisés en cours d'eau [→ exemples répertoriés dans le tabl. 4.2]. Ils permettent les mêmes déploiements que les courantomètres électro-magnétiques et les ensembles moulinets-compteurs d'impulsions. Leur principal avantage est de permettre le calcul du débit, dès la fin de l'exploration des vitesses de la section, par différentes méthodes de calcul, dont celui de la norme NF EN ISO 748 (2007) *Hydrométrie - Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de moulinets ou de flotteurs*.

Tabl. 4.2 - Exemples de courantomètres acoustiques Doppler connus sur le marché français.

Marque	Type	Gamme de vitesse	Avantage	Inconvénient
Ott	ADC	- 0,2 à 2,4 m/s	Perche universelle Ott, mesure de profondeur automatisée	Mesure par deux faisceaux divergents
SonTek	FlowTracker	0,001 à 4 m/s	Calcul d'incertitude associé, mesure ponctuelle, tridimensionnelle (possible quel que soit l'angle de la vitesse vue)	Perche spéciale

### ■ Principe physique

Des impulsions ultrasonores sont émises par les transducteurs placés dans la sonde, et ré-émises par les particules en suspension dans l'eau. La vitesse d'écoulement est mesurée par effet Doppler [→ chapitre 5 sur les profileurs de courant], en évaluant le déphasage entre les impulsions émises et reçues par les transducteurs.

### ■ Avantages

- Maintenance limitée (pas de pièces en mouvement) ;
- facilité de jaugeage et gain de temps (le jaugeur est guidé par le logiciel pour la mesure et le dépouillement) ;
- certains modèles sont équipés d'un capteur de pression permettant les mesures de hauteur totale et de profondeur d'immersion ;
- dans certains modèles un calcul d'incertitude est associé au résultat final.

### ■ Inconvénients

- Le prix encore élevé de ces d'instruments ;
- les capteurs, comme d'autres, sont fragiles et soumis à des perturbations (bulles d'air, végétation, chocs) ;
- certains modèles sont équipés d'une perche à positionnement proportionnel, d'un maniement différent de celui des perches classiques à lecture directe de la position.

### ■ Mise en garde

Certains constructeurs annoncent des instruments ne nécessitant pas d'étalonnage. En réalité, si l'analyse du signal acoustique ne nécessite pas d'étalonnage, l'ensemble de la chaîne de mesure nécessite des vérifications. Ces instruments de mesure doivent donc être contrôlés annuellement par des essais comparatifs *in situ* avec d'autres instruments de mesure des vitesses. Ils peuvent également faire l'objet de vérifications en bassin rectiligne selon la norme ISO 3455 (2007).

## 4.2.4 Perche support pour courantomètres

### ■ Remarque préliminaire

Un courantomètre est étalonné avec un montage donné et doit donc être utilisé avec ce montage. L'utilisation d'un type de montage différent de celui spécifié peut entraîner des erreurs de mesure non négligeables.

Les perches support pour courantomètres sont utilisées pour répartir les points de mesure dans la section. La perche va permettre de déterminer la hauteur d'eau pour chaque verticale choisie et la profondeur d'immersion du capteur. La lecture de la hauteur d'eau totale et de la profondeur d'immersion du capteur peut être numérique avec les dernières générations de capteurs (exemple : ADC, Ott). L'opérateur se place dans le lit du cours d'eau, jambes écartées, de manière à perturber le moins possible l'écoulement. L'ensemble perche/courantomètre est maintenu le plus loin possible vers l'amont.

Il existe autant de perches support différentes que de fabricants de courantomètres [→ fig. 4.2, 4.3, 4.4]. Les montages et modes opératoires sont décrits dans les notices techniques fournies avec le matériel. Les autres types de supports (saumons, câbles de suspension, treuils, etc.) sont employés pour la mesure de débits importants et nécessitent la mise en œuvre de matériels lourds et de techniques complexes occasionnant, de plus, des coûts élevés. Ces méthodes ne correspondent pas à l'objectif de ce guide et ne sont donc pas présentées.



Cemagref

a



Cemagref

b



DREAL Midi-Pyrénées

c



DREAL Midi-Pyrénées

d



DREAL Midi-Pyrénées

e

Figure 4.4. Exemples de courantomètres acoustiques Doppler utilisés en France : ADV FlowTracker SonTek (a, b), ADC Ott (c, d, e).



L'extrémité inférieure de la perche doit être munie d'une « semelle » pour l'empêcher de s'enfoncer dans le lit du cours d'eau. Certaines perches sont munies d'une pointe en dessous de la semelle ce qui permet un meilleur maintien dans les zones à fortes vitesses. La longueur de cette pointe doit être prise en compte pour les mesures de profondeur lors des jaugeages sur des ouvrages bétonnés ou les lits de cours d'eau sans substrat meuble.

Les perches peuvent dans certains cas être équipées de rallonges télescopiques qui permettent des jaugeages dans des zones plus profondes ( $1.5 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$ ) (par exemple depuis une passerelle ou une embarcation).

#### ■ **Limites**

Les perches légères ne sont utilisables que pour des sections où la vitesse est inférieure à 2 m/s. La hauteur d'eau sera également un facteur limitant pour l'accès au cours d'eau à pied : en général si la hauteur d'eau dépasse l'entrejambe ( $< 1 \text{ m}$ ) il est difficile de jauger même pour des vitesses inférieures à 1 m/s. Depuis une passerelle ou une embarcation, il est possible de déployer une perche télescopique sur des profondeurs supérieures, mais selon la vitesse d'écoulement, la poussée et les oscillations de la perche peuvent compromettre la stabilité du courantomètre.

Un courantomètre mécanique (moulinet) ne doit pas être utilisé lorsque le tirant d'eau est inférieur à quatre fois le diamètre de l'hélice ou du corps du moulinet. De même, les courantomètres électromagnétiques ou acoustiques ne doivent pas être utilisés lorsque le tirant d'eau est inférieur à trois fois la dimension verticale du capteur. Dans tous les cas, aucune partie du courantomètre ne doit dépasser la surface de l'eau <sup>7</sup>.

### 4.2.5 Étalonnage et vérification des courantomètres

Les courantomètres sont des appareils de précision conçus pour introduire dans la mesure de la vitesse des erreurs négligeables lorsqu'ils sont en bon état et utilisés correctement. Ce matériel doit donc être manipulé avec soin, aussi bien au cours des mesures que pendant le transport et des précautions doivent également être prises pour le stockage.

Le bon fonctionnement des capteurs utilisés pour l'exploration des champs de vitesses doit être vérifié régulièrement par les équipes d'hydrométrie qui les exploitent. L'étalonnage permet un réglage de la réponse du capteur et il doit s'accompagner d'un certificat délivré par un organisme lui-même certifié. Privilégier des laboratoires d'étalonnage certifiés dont le protocole est conforme à la norme ISO 3455 (2007), ce qui n'est pas toujours le cas chez les constructeurs. En particulier, un contrôle comparatif entre instruments en laboratoire ne constitue pas un étalonnage conforme.

Le contrôle (ou vérification) est moins encadré mais il peut permettre la mise en évidence d'une défaillance du capteur ou de la concordance avec les valeurs considérées comme références. Il est donc intéressant de réaliser régulièrement (au moins une fois par an) des contrôles comparatifs *in situ* avec d'autres instruments de mesure des vitesses.

#### ■ **Étalonnage des courantomètres**

L'étalonnage de courantomètres en bassins découverts rectilignes est encadré par la norme ISO 3455 (2007). 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.

7 - Dans le cas particulier du courantomètre Doppler Flowtracker à trois branches, l'appareil peut fonctionner avec les deux branches inférieures immergées et la branche supérieure hors d'eau. La composante verticale de la vitesse n'est alors pas mesurée, ce qui ne change pas le débit obtenu lors d'un jaugeage.

L'étalonnage n'est valable que pour le montage du courantmètre utilisé pour les essais. Quelques laboratoires en Europe [→ tabl. 4.3] proposent ce type d'étalonnage, aucun à l'heure actuelle en France. En 2009, les prix unitaires proposés allaient de 90 € à 250 €, voire 700 €. Les étalonnages et essais proposés doivent être en conformité avec la norme ISO 3455 (2007). Il faut notamment que le contrôle de vitesse du chariot tracteur soit certifié métrologiquement. Les courantmètres mécaniques (moulinets), les courantmètres électro-magnétiques et depuis peu les courantmètres acoustiques peuvent être étalonnés en bassin rectiligne.

Lieu	Organisme	Matériel pris en charge
Kempten	Allemagne Ott	C2, C31, Nautilus...
Ittigen	Suisse OFEV	Tous types de courantmètres
Delft	Pays-Bas WL Delft Hydraulics	Consulter
Bratislava	Slovaquie VUVH	Consulter

Tabl. 4.3 - Exemples de laboratoires d'étalonnage en Europe.

### ■ Contrôles ou vérifications

Les constructeurs de capteurs proposent un certain nombre de contrôles à faire périodiquement. Des campagnes d'essais interlaboratoires ou entre appareils peuvent être mises en place, consistant à comparer des résultats de mesure lors d'une campagne de jaugeage commune. Des procédures internes de vérifications régulières des courantmètres sont en place dans certains organismes.

## 4.3 Mode opératoire

Le but des opérations de terrain consiste à déterminer la vitesse moyenne de l'écoulement sur différentes verticales (à partir de mesures de vitesse ponctuelles) et la surface des éléments de section correspondants (à partir de mesures de distances horizontales et verticales).

### 4.3.1 Généralités

#### 4.3.1.1 Recommandations générales

- Le bief doit être rectiligne sur une distance suffisante (au moins deux fois sa largeur à l'amont de la section de mesure et une fois sa largeur à l'aval) ;
- le régime hydraulique doit être permanent (débit constant) pendant toute la durée de la mesure. Vérifier que le niveau d'eau, la bathymétrie et la position des ouvrages ne varient pas au cours du jaugeage ;
- les moulinets ne doivent pas être utilisés lorsque des corps flottants ou immergés risquent de perturber la rotation de l'hélice ;
- le courantmètre doit être orienté correctement<sup>8</sup> et conserver une position horizontale stable pendant toute la durée de la mesure ;
- la perche doit être maintenue rigoureusement en position verticale et l'on ne doit pas lire les graduations sur sa face amont (de préférence sur le côté).

Matériel nécessaire en plus du matériel hydrométrique proprement dit :

- matériel lié aux consignes de sécurité [→ section 2.5] et équipements de protection individuels adaptés à vos travaux ;
- caisse d'outillage avec outils classiques (clés, tournevis, pinces, etc.), décamètre ;
- clés spécifiques pour le dépannage du matériel de jaugeage ;
- pelle, pioche, jalons, masse, etc. (pour l'aménagement et la matérialisation de la section de mesure choisie) ;

<sup>8</sup> - Face au courant, axe du courantmètre maintenu perpendiculaire au décamètre, (sauf cas particulier des hélices non auto-composantes, à aligner sur la direction de l'écoulement. L'angle d'incidence, ou de dérive, doit alors être mesuré et pris en compte dans le dépouillement du jaugeage).

- balai-brosse pour nettoyer les échelles limnimétriques ou autres repères ;
- fiches de terrain pour le relevé des observations et des mesures [→ fiches proposées en Annexe E].

#### 4.3.1.2 **Choix de l'emplacement de mesure**

La précision dans la détermination du débit se trouve accrue si :

- les conditions de l'écoulement ne varient pas pendant la durée de la mesure ;
- les vitesses en tous points de l'écoulement sont parallèles entre elles et à angle droit avec la section de mesure ;
- la répartition des vitesses le long des verticales ou des horizontales de mesure est régulière ;
- les dimensions géométriques de la section de mesure sont nettement définies.

Afin de respecter au mieux ces recommandations, l'emplacement de mesure choisi doit donc, autant que possible, présenter les caractéristiques suivantes :

- le bief doit être rectiligne et présenter une section et une pente uniformes ;
- l'écoulement doit être contenu dans un ou plusieurs chenaux aux limites stables ;
- l'emplacement doit être éloigné de tout coude ou de tout obstacle, naturel ou artificiel, susceptible d'engendrer une perturbation de l'écoulement (les filets liquides doivent être parallèles) ;
- les sites où ont tendance à se produire des tourbillons, des courants de retour ou des zones d'eaux mortes, doivent être évités ;
- les emplacements situés dans un écoulement convergent, et encore plus dans un écoulement divergent sur une section de mesure oblique, doivent être évités ;
- la profondeur de l'eau doit être suffisante pour assurer l'immersion effective des appareils de mesure utilisés, sans risque de frottements sur le fond ;
- le lit du bief doit rester stable ;
- l'emplacement ne doit pas être obstrué par des obstacles (branches d'arbres par exemple) et doit être débarrassé de toute végétation aquatique pendant la durée de la mesure ;
- le vent ayant une influence notamment sur les vitesses de surface, choisir le bief de façon à minimiser son action (écoulement perpendiculaire à la direction du vent) ;
- si la mesure a lieu près d'un pont comportant des piles, elle doit être effectuée de préférence en amont du pont (sauf cas d'embâcles), ou sous le pont, en évitant l'aval immédiat.

Dans la pratique, il est difficile de respecter l'ensemble des conditions idéales pour le choix de la section. D'où l'importance de bien renseigner les fiches de terrain sur les conditions de mesure (éventuellement, prendre des photos).

Faire une reconnaissance préliminaire du site avant de choisir un emplacement : effectuer des mesures approximatives de la largeur, de la profondeur et des vitesses pour vérifier que les profils longitudinal et transversal du lit et la distribution des vitesses sont acceptables en vue d'une mesure du débit. Il est important de bien reconnaître la section avant d'entamer la mesure, en particulier sur un site qu'on découvre (nature du fond, obstacles, trous, . . .), pour s'assurer qu'on pourra passer sans encombre. De même, se renseigner sur les variations brutales possibles à l'aval des ouvrages.

Vérifier que le niveau d'eau est constant sur toute la période de mesure. Mieux vaut observer le niveau d'eau non seulement en début et fin de jaugeage,



mais également en cours de jaugeage, surtout quand la mesure est longue. Une variation intermédiaire de niveau est rare mais possible. Lorsque le site de jaugeage est dépourvu d'échelle limnimétrique, l'évolution du niveau sera observée à l'aide d'un repère provisoire : échelle mobile installée par l'opérateur, piquet planté en bord de cours d'eau éventuellement gradué, repérage visuel sur la végétation ou sur un objet fixe.

#### 4.3.1.3 Aménagement du bief de mesure

Dans la plupart des cas, il est nécessaire, avant de commencer la mesure, de réaliser des petits travaux d'aménagement sur le bief choisi [→ fig. 4.5], afin de se rapprocher au maximum des conditions optimales. Il n'existe pas de recette universelle pour la mise en œuvre de ces opérations car les conditions de terrain sont trop variées. Il faut donc s'adapter aux spécificités rencontrées, le but étant d'obtenir un chenal répondant au mieux aux diverses recommandations énoncées au paragraphe 4.3.1.2 (en particulier, vitesses parallèles entre elles et perpendiculaires à la section transversale du cours d'eau, section de mesure bien définie et régulière).

Selon les particularités du site, on pourra par exemple mettre en œuvre les aménagements suivants :

- modification de l'orientation de l'écoulement (sur toute ou partie de sa largeur) ;
- création d'une « section rétrécie » si la profondeur du chenal est insuffisante ou si les vitesses sont trop faibles ou trop irrégulièrement réparties ;
- amélioration de la régularité du lit.

Ces diverses opérations (canalisation de l'écoulement, colmatage des fuites, installation momentanée de petites digues) peuvent être effectuées en utilisant les matériaux naturels se trouvant sur le site (cailloux, argile, branches, etc.) ou à l'aide d'éléments artificiels éventuellement disponibles (planchettes, plaques métalliques, etc.). Les modifications de la section doivent rester limitées et réversibles.

Avant d'effectuer la mesure, attendre que le niveau de l'eau se stabilise ; et si des digues ont été édifiées, bien vérifier qu'il n'y ait pas de fuite ni de dérivation à l'amont, d'une partie des eaux due au relèvement artificiel du plan d'eau.

Il faut éviter absolument d'avoir à faire des modifications, même mineures, de la section de mesure en cours de mesure. Pour cela, prendre le temps de parcourir l'ensemble du transect de jaugeage avant le début du jaugeage pour repérer toutes les singularités à éliminer, telles que blocs ou débris végétaux.

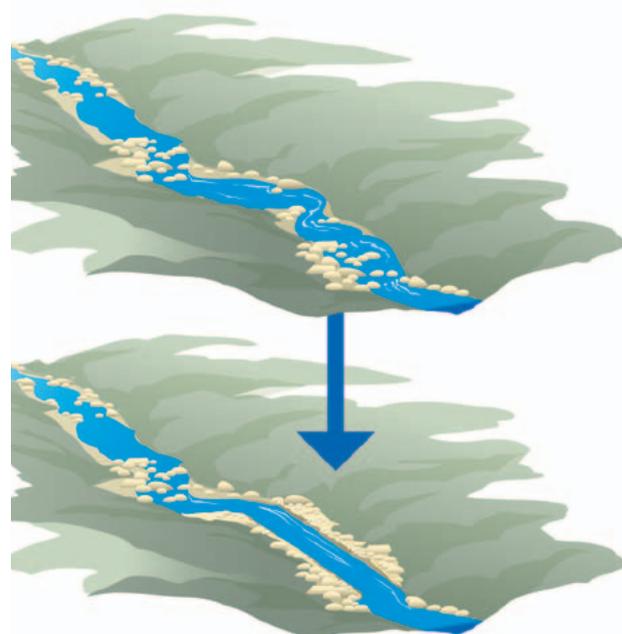


Fig. 4.5 - Exemple d'aménagement du bief de mesure.  
En haut, bief initial ;  
en bas bief aménagé.

### 4.3.2 Distribution des verticales et points de mesure

#### 4.3.2.1 Échantillonnage des vitesses et profondeurs

La méthode de jaugeage par exploration du champ des vitesses revient à échantillonner la géométrie de la section (profondeurs) et les vitesses sur un semis de points distribués à travers la section du cours d'eau. Cet échantillonnage doit être suffisamment dense et judicieusement réparti pour que le calcul du débit total donne une approximation acceptable du débit réel. À l'inverse, un échantillonnage inutilement dense, ou mal distribué dans la section, entraînera une perte de temps, un risque accru de variation du régime hydraulique durant la mesure, sans réel gain de qualité de mesure.

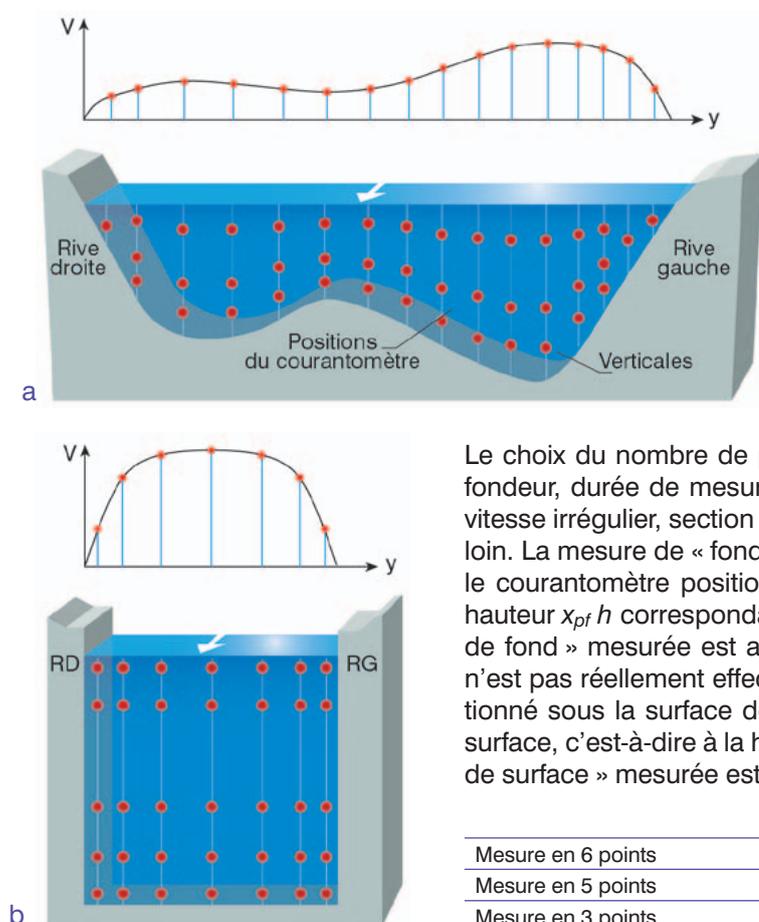


Fig. 4.6 - Exemple de répartition des points de mesure dans la section de jaugeage pour une section large (a) et pour une section étroite et profonde (b).

Les points de mesure se situent à différentes hauteurs sur des verticales de mesure réparties dans la largeur de la section, et sur lesquelles la profondeur est mesurée [→ fig. 4.6].

Dans le cas de l'application des formules algébriques à 1 à 6 points [→ § 4.4.1.1], les positions des points de mesure sur chaque verticale sont imposées et doivent absolument être respectées. Le tableau 4.4 donne la position des points de mesure sur la verticale selon le nombre de points choisi, conformément à la norme NF EN ISO 748 (2007)<sup>9</sup>.

Le choix du nombre de points sera dicté par les contraintes pratiques (profondeur, durée de mesure) et par le type d'écoulement à décrire (profils de vitesse irrégulier, section étroite). Des recommandations sont proposées plus loin. La mesure de « fond » n'est pas réellement effectuée au fond, mais avec le courantomètre positionné en butée basse de la perche, c'est-à-dire à la hauteur  $x_{pf} h$  correspondant à la constante de fond de la perche. La « vitesse de fond » mesurée est alors notée  $v_{pf}$ . Également, la mesure de « surface » n'est pas réellement effectuée à la surface, mais avec le courantomètre positionné sous la surface de sorte qu'aucune partie du capteur ne dépasse la surface, c'est-à-dire à la hauteur  $x_s h$  mesurée au-dessus du fond. La « vitesse de surface » mesurée est alors notée  $v_s$ .

Mesure en 6 points	fond	0,2h	0,4h	0,6h	0,8h	surface
Mesure en 5 points	fond	0,2h	0,4h		0,8h	surface
Mesure en 3 points		0,2h	0,4h		0,8h	
Mesure en 2 points		0,2h			0,8h	
Mesure en 1 points			0,4h			

Tabl. 4.4 - Position des points de mesure sur la verticale selon le choix du nombre de points.

Il est difficile de donner des règles universelles sur le placement et le nombre des verticales, qui dépendent de contraintes pratiques et peuvent être adaptés par un jaugeur expérimenté. Il convient cependant toujours de chercher à décrire au mieux les portions de la section où les variations de profondeur et/ou de vitesse sont rapides ou irrégulières, surtout si ces portions de section contribuent significativement au débit total. En effet, les méthodes de dépouillement supposent généralement une variation linéaire de la géométrie du fond et de la vitesse moyenne entre deux verticales de mesure. Il convient donc de rapprocher les verticales aux endroits où la variation des vitesses dans le sens horizontal est grande et au droit des discontinuités brusques et importantes de la cote du fond.

On retiendra les recommandations suivantes, valables pour tout type de section :

- placer les verticales de manière à bien décrire les variations de profondeur et/ou de vitesse en travers de la section ;
- placer les points de mesure de vitesse aux hauteurs relatives prescrites en fonction du nombre de points ;
- respecter au total un nombre minimal de trente points de mesure de vitesse répartis dans la section ;
- justifier sur la fiche terrain tout écart aux bonnes pratiques recommandées dans la documentation et dans la normalisation.

9 - Attention : dans ce guide, la position du courantomètre sur la verticale est exprimée par sa hauteur au-dessus du fond, et non comme sa profondeur d'immersion depuis la surface. Par conséquent, l'expression des formules algébriques est différente de ce qu'on trouve dans la norme NF EN ISO 748 (2007), qui positionne les mesures par la profondeur d'immersion du capteur mesurée depuis la surface de l'écoulement.

#### 4.3.2.2 Cas d'une section large

Pour une section large (type section naturelle de cours d'eau alluvial), le protocole suivant est recommandé, et doit bien entendu être adapté aux cas réels avec bon sens.

Il est recommandé d'utiliser au moins **11 à 15 verticales** afin de limiter le nombre de sous-sections représentant plus de 10 % du débit total, et faire en sorte que le débit partiel ne dépasse 15 % sur aucune sous-section ; il est toutefois acceptable de retirer des verticales de portions de la section où la profondeur et la vitesse sont constantes.

On privilégiera la méthode algébrique à **trois points sur la verticale**, qui dans le cas d'un écoulement régulier est un optimum pour réduire l'incertitude de mesure [cf. valeurs indiquées par la norme NF EN ISO 748 (2007)] tout en limitant la durée du déploiement. Les mesures de vitesse  $v_x$  sont effectuées aux hauteurs  $x \times h$  suivantes, **mesurées depuis le fond du cours d'eau** :  $0,2h$ ,  $0,4h$  et  $0,8h$ , avec  $h$  le tirant d'eau.

Lorsque la profondeur totale sur une verticale est trop faible<sup>10</sup>, on appliquera la méthode à un point placé à la hauteur relative  $0,4h$  depuis le fond.

#### 4.3.2.3 Cas d'une section étroite et profonde

Pour une section étroite et profonde (type canal de dérivation maçonné), il est souvent nécessaire de réduire le nombre de verticales à cause de l'encombrement du matériel et de la distance minimale du courantomètre aux parois. En revanche, il est utile d'augmenter le nombre de points sur chaque verticale pour réduire les erreurs liées à des profils verticaux de vitesse plus irréguliers qu'en section large (influence des parois).

On essaiera de maintenir un nombre minimal de six verticales, tout en décrivant au mieux la variation de vitesse près des bords. La géométrie d'un canal étant généralement très régulière, on disposera les verticales en fonction des variations de vitesse sur la largeur.

On privilégiera la méthode algébrique à cinq points sur la verticale. Dans tous les cas, respecter un minimum de trente points de mesure de vitesse au total.

### 4.3.3 Protocole de mesure

#### 4.3.3.1 Mesure des distances entre les verticales

La position des bords de la section et des verticales de mesure doit être repérée le long de la section de mesure dans un même repère [→ fig. 4.7]. En général, ces abscisses sont mesurées à l'aide d'un décimètre tendu en travers de la section de mesure. Pour les petites largeurs, l'opérateur peut aussi s'aider de la perche graduée (mise à l'horizontale) pour mesurer les distances.

Ne pas oublier de spécifier sur la fiche de terrain les abscisses des rives, en indiquant la rive droite ou la rive gauche du cours d'eau. Lorsque c'est possible, il est pratique de choisir l'origine au niveau même de l'un des deux bords du plan d'eau, pour simplifier les calculs.

#### 4.3.3.2 Mesure des profondeurs et hauteurs des points de mesure

Ces distances (position du courantomètre et profondeur selon chacune des verticales) sont déterminées à l'aide de la perche support, soit par lecture directe, soit en utilisant le dispositif de repérage du courantomètre. Dans ce

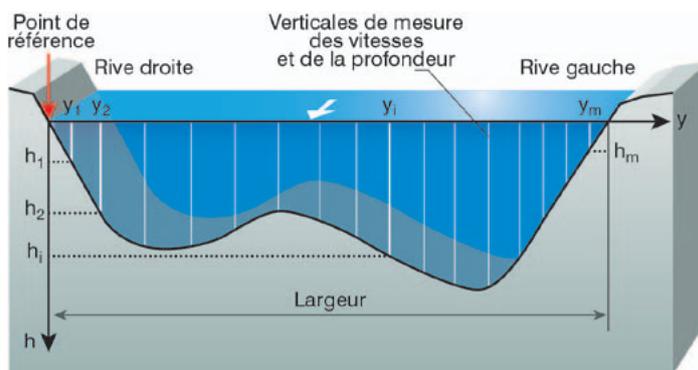


Fig. 4.7 - Repérage des verticales de mesure et tirant d'eau en travers de la section de jaugeage.

<sup>10</sup> - Rappel : le tirant d'eau sur une verticale ne doit pas être inférieur à quatre fois le diamètre de l'hélice ou du corps d'un moulinet, ni inférieur à trois fois la dimension verticale d'un courantomètre électro-magnétique ou acoustique.

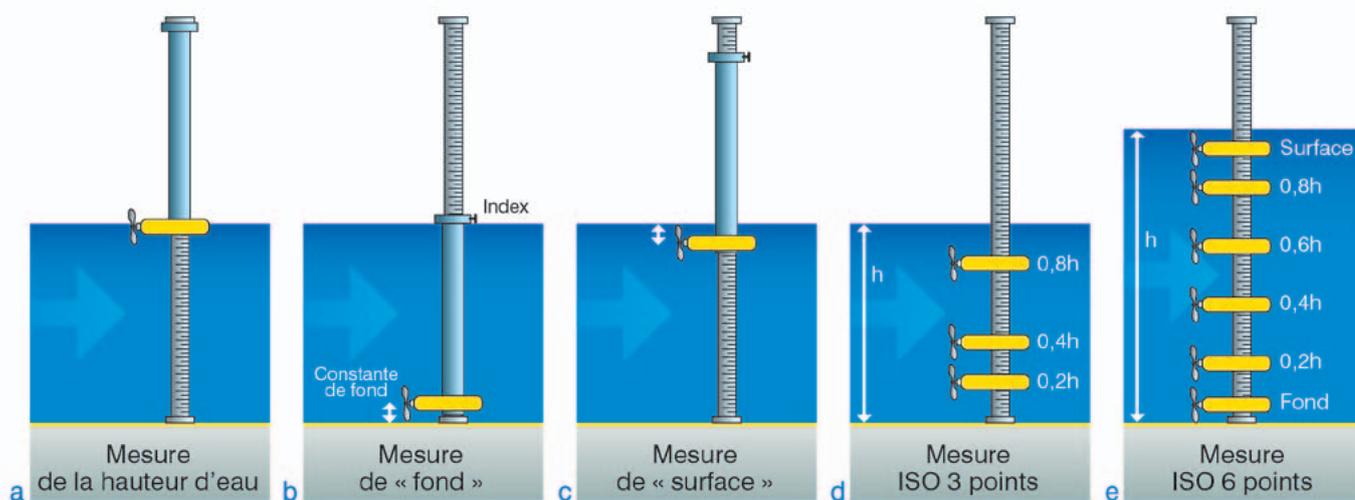


Fig. 4.8 - Mesure des distances sur les verticales (hauteurs du capteur mesurées depuis le fond).

cas, la surface du plan d'eau est repérée en positionnant l'axe du capteur au niveau de la surface de l'eau [→ fig. 4.8.a]. Le courantomètre est ensuite descendu jusqu'au fond et sa position est lue à nouveau. En général, une butée arrête la descente du courantomètre avant que le capteur ne touche le fond<sup>11</sup>. Pour obtenir la cote réelle du fond, il faut donc tenir compte de cette distance appelée communément « constante de fond ». La profondeur est obtenue par différence entre la lecture à la surface et la lecture au fond, après avoir ajouté cette constante de fond. On peut réaliser une première mesure de vitesse à ce niveau, appelée « mesure de fond » [→ fig. 4.8.b].

Une fois la profondeur mesurée, le courantomètre est positionné au niveau des différents points de mesure des vitesses. La position de ces points est déterminée en tenant compte de la profondeur mesurée et du nombre de points que l'on désire réaliser sur la verticale. Il est pratique de positionner chaque point par rapport au précédent en remontant vers la surface [→ fig. 4.8.d et e]. Pour une « mesure de vitesse de surface » au moulinet, l'hélice doit être complètement immergée, donc son axe doit être situé à une distance de la surface du plan d'eau au moins égale à la moitié du diamètre de l'hélice [→ fig. 4.8.c].

#### 4.3.3.3 Mesure des vitesses ponctuelles

La vitesse de l'écoulement perpendiculaire à la section de jaugeage est relevée au niveau de chaque point choisi sur la section. Pour réduire l'incertitude à un niveau acceptable, le courantomètre doit être exposé pendant une durée minimale<sup>12</sup>, en fonction du type de capteur et de la gamme de vitesse mesurée.

Pour un courantomètre mécanique (moulinet), on respectera idéalement au moins 50 impulsions et au moins 30 secondes. Le nombre de tours d'hélice est déterminé à l'aide d'un compteur d'impulsions connecté sur le corps du moulinet. Les compteurs électroniques permettent de présélectionner le temps d'exposition ou le nombre d'impulsions.

Pour les autres types de courantomètres (électromagnétiques et acoustiques), respecter le temps d'exposition prescrit dans la documentation du constructeur.

Attention aux courants de retour : pour un moulinet vérifier que l'hélice tourne bien dans le bon sens pendant toute la durée de la mesure. Un petit fanion fixé à la perche peut servir de girouette pour vérifier l'axe de l'écoulement. Les courantomètres électro-magnétiques et acoustiques sont théoriquement capables de mesurer les courants obliques et même inversés, mais il reste préférable d'éviter cette situation.

11 - Pour un moulinet, la longueur de la butée doit être réglée en fonction du diamètre de l'hélice utilisée (l'axe de l'hélice doit être situé à une distance du fond du chenal supérieure à 0,75 fois le diamètre de l'hélice).

12 - Cette durée doit être compatible avec les données constructeur relatives à la plage d'utilisation du courantomètre, en particulier pour une hélice la fréquence de rotation admissible.

### → Exemple de jaugeage à cinq points au moulinet en utilisant un fourreau ou une pige

Détermination de la profondeur :

Lecture surface : 155 cm

Lecture fond : 105 cm

Constante de fond : 4 cm

→ Tirant d'eau :  $h = 155 - 105 + 4 = 54$  cm

Repérage des points de mesure de vitesse :

- mesure de « fond » : → moulinet posé au fond (en butée basse)  
 $z = \text{constante de fond} = 4$  cm
- 3 mesures intermédiaires : soit pour  $z = 0,2h, 0,4h$  et  $0,8h$   
 $0,2h = 2 \times 54/10 = 11$  cm
  - 11 - 4 = 7 cm → moulinet remonté de 7 cm
  - 11 cm → moulinet remonté de 11 cm
  - $2 \times 11 = 22$  cm → moulinet remonté de 22 cm
- mesure de « surface » : diamètre de l'hélice : 5 cm  
→ moulinet immergé à 3 cm sous la surface



## 4.4 Dépouillement des mesures

### 4.4.1 Détermination de la vitesse moyenne sur chaque verticale

Les mesures de vitesse en plusieurs points sur chaque verticale sont effectuées pour avoir une approximation de la vitesse de l'écoulement moyenne sur la verticale. Cette approximation sera d'autant meilleure que le nombre de points sur la verticale sera important. Cependant, pour un écoulement régulier (profil vertical logarithmique), le gain en incertitude devient assez faible au-delà de trois points.

#### 4.4.1.1 Formules algébriques (1 à 6 points)

Lorsque le nombre de points sur la verticale est réduit (de 1 à 6), la vitesse moyenne sur la verticale est calculée à partir de formules algébriques, qui s'appliquent à condition de positionner les points de mesure de vitesse à des hauteurs (mesurées depuis le fond) déterminées [→ fig. 4.8]. Ces formules simples ont une base physique robuste : elles sont valables si la distribution verticale des vitesses suit un profil logarithmique, quelles que soient la rugosité du fond et la vitesse moyenne sur la verticale. Cette hypothèse est souvent acceptable pour un écoulement régulier et uniforme.

On donne ci-dessous les formules à appliquer [→ norme NF EN ISO 748 (2007)] pour calculer la vitesse moyenne sur la verticale  $v_{moy}$  à partir des vitesses ponctuelles  $v_s$  (vitesse de surface),  $v_{pf}$  (vitesse au fond<sup>13</sup>),  $v_x$  (vitesse mesurée à la distance  $x \times h$  au-dessus du fond<sup>14</sup>, avec  $h$  le tirant d'eau).

Mesure en 1 point :  $v_{moy} = v_{0,4}$

Mesure en 2 points :  $v_{moy} = 0,5 \times (v_{0,8} + v_{0,2})$

Mesure en 3 points :  $v_{moy} = 0,25 \times (v_{0,8} + 2v_{0,4} + v_{0,2})$

Mesure en 5 points :  $v_{moy} = 0,1 \times (v_s + 3v_{0,8} + 3v_{0,4} + 2v_{0,2} + v_{pf})$

Mesure en 6 points :  $v_{moy} = 0,1 \times (v_s + 2v_{0,8} + 2v_{0,6} + 2v_{0,4} + 2v_{0,2} + v_{pf})$

13 - Il s'agit en pratique d'une mesure de vitesse réalisée le plus près possible du fond, en butée basse de la perche. Avec les formules algébriques, aucune vitesse de fond n'est estimée à l'aide d'un coefficient de fond par exemple.

14 - **Attention** : dans ce guide, la position du courantomètre sur la verticale est exprimée par sa hauteur au-dessus du fond, et non comme sa profondeur d'immersion depuis la surface. Par conséquent, l'expression des formules algébriques est différente de ce qu'on trouve dans la norme NF EN ISO 748 (2007), qui positionne les mesures par la profondeur d'immersion du capteur mesurée depuis la surface de l'écoulement.

#### 4.4.1.2 Intégration sur la verticale

Il est également possible de calculer directement la vitesse moyenne sur la verticale, en intégrant les mesures de vitesses par la méthode des trapèzes (logiciel *Bareme* par exemple) ou par la méthode des splines (logiciel *Jasmine* par exemple). La vitesse de fond  $v_f$  est souvent extrapolée à l'aide de la vitesse mesurée près du fond  $v_{pf}$  et d'un coefficient de fond  $k_f$  (logiciels *Cassiopee-Moulinet* 1996, *Bareme*) :

$$v_f = (2k_f - 1)v_{pf}$$

Cette méthode n'est acceptable que pour un nombre suffisant de points de mesure sur la verticale (typiquement supérieur à six) et une bonne description des variations de vitesse. Le nombre et l'espacement des points doit ainsi être choisi de manière que la différence de vitesse entre deux points adjacents ne dépasse pas 20 % de la vitesse la plus élevée mesurée sur la verticale (norme NF EN ISO 748, 2007).

Cette méthode de mesure détaillée et longue à mettre en œuvre n'est pas recommandée dans le cadre d'un contrôle de débit minimal, à moins que l'écoulement soit irrégulier (dans ce cas mieux vaut changer de section de jaugeage). Elle n'est donc pas décrite dans ce guide. Dans sa nouvelle version, le logiciel *Cassiopee-Moulinet* (2011) ne propose plus la méthode directe d'intégration de la vitesse sur la verticale, mais seulement les formules algébriques (1 à 6 points) spécifiées par la norme NF EN ISO 748 (2007), sans recours à un coefficient de fond.

Dans le cas particulier d'une mesure de vitesse par méthode intégratrice (perche intégratrice), la vitesse moyenne sur la quasi-totalité de la verticale est directement mesurée. Il ne reste alors qu'à intégrer sur la couche inexploree au fond, à l'aide d'une extrapolation de vitesse (coefficient de fond), pour calculer la vitesse moyenne sur toute la verticale. Cette méthode, quasiment jamais employée dans le cadre de contrôles de débit, n'est pas présentée dans cet ouvrage.

#### 4.4.1.3 Cas des verticales de rives

Plusieurs stratégies pour estimer les débits aux bords de la section de jaugeage sont possibles, en tenant compte de la forme de la berge.

Une méthode classique (cas du logiciel *Bareme*) consiste à affecter une profondeur et une vitesse à la rive égale à  $(2k_r - 1)$  fois la vitesse moyenne mesurée sur la verticale adjacente, avec  $k_r$  un coefficient de rive. La méthode d'intégration choisie, par section médiane ou moyenne, peut alors être appliquée jusqu'au bord de l'écoulement.

Les valeurs de  $k_r$  sont comprises entre 0,5 et 1 (comme pour un coefficient de fond). Les valeurs classiquement utilisées sont  $2/3 \approx 0,667$  (soit une vitesse de rive égale au tiers de la dernière vitesse mesurée) et  $3/4 = 0,75$  (soit une vitesse de rive égale à la moitié de la dernière vitesse mesurée). Le cas limite  $k_r = 1$ , correspondant à une vitesse constante jusqu'au bord, donne la plus grande valeur de débit possible, intéressante dans le cas d'un contrôle de débit minimal.

Dans sa version actuelle (1996), le logiciel *Cassiopee-Moulinet* traite les débits aux bords différemment. Un coefficient de rive  $k_r$  sert ici à calculer la surface mouillée  $S_r$  comprise entre la rive et la verticale de mesure adjacente comme suit :

$$S_r = k_r h_i L_r$$

avec  $L_r$  distance entre la rive et la verticale de mesure adjacente,  $h_i$  profondeur de cette verticale.



Le coefficient de rive  $k_r$  n'a donc pas du tout la même signification que dans le cas précédent. Ce coefficient de fond  $k_f$  prend ses valeurs entre 0 (section mouillée  $S_r$  nulle, débit de bord nul) et 1 ( $S_r$  maximale, correspondant au cas d'une berge de forme rectangulaire). Une valeur  $k_r = 0,5$  correspond au cas d'une berge de forme triangulaire. Le cas limite  $k_r = 1$  donne la plus grande valeur de débit possible, intéressante dans le cas d'un contrôle réglementaire.

Dans sa nouvelle version, le logiciel *Cassiopée-Moulinet* (2011) propose le mode de calcul des débits aux bords de la norme NF EN ISO 748 (2007) (identique au logiciel *Bareme*) avec la valeur préconisée par défaut par la norme ( $k_r = 0,86$ , soit un exposant de loi puissance égal à  $1/6$ ).

## 4.4.2 Calcul du débit

À partir des données obtenues (vitesses moyennes, distances à la rive des verticales et profondeur selon chacune de ces verticales), le débit peut être déterminé par un calcul d'intégration. La section est décomposée en un ensemble de sous-sections de surface  $S_i$  limitées par les verticales de mesure auquel on affecte une vitesse moyenne  $V_i$ .

Le débit partiel  $q_i$  pour chaque sous-section est calculé en multipliant la vitesse moyenne  $V_i$  par la surface  $S_i$  de l'élément correspondant :

$$q_i = V_i \times S_i$$

Le débit total  $Q$  est obtenu en faisant la somme des débits partiels  $q_i$  calculés pour chaque sous-section. Il existe plusieurs méthodes pour estimer les surfaces  $S_i$  et vitesses moyennes correspondantes  $V_i$ . Nous nous limiterons ici à la « méthode de la section médiane » et à la « méthode de la section moyenne » [→ norme NF EN ISO 748 (2007)].

N.B. Pour des jaugeages classiques, les différentes méthodes de dépouillement fournissent généralement des débits calculés équivalents, à 1 % près typiquement.

### 4.4.2.1 Méthode de la section médiane

La méthode de la section médiane (ou « méthode des rectangles ») considère que la vitesse moyenne  $v_{moy}$  mesurée sur chaque verticale est représentative de la vitesse de l'écoulement sur une sous-section rectangulaire incluant la verticale de mesure [→ fig. 4.9a].

La section transversale du cours d'eau est ainsi décomposée en un certain nombre de sous-sections rectangulaires juxtaposées. La largeur  $b_i$  de chaque sous-section est égale à la somme des deux demi-distances entre la verticale de mesure et chacune des deux verticales voisines situées de part et d'autre. La surface  $S_i$  de chaque sous-section sera considérée comme égale au produit de cette largeur  $b_i$  par le tirant d'eau  $h_i$  au niveau de chaque verticale. On obtient donc :

$$S_i = b_i \times h_i = h_i \left( \frac{y_{i+1} - y_i}{2} + \frac{y_i - y_{i-1}}{2} \right) = h_i \left( \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2} \right)$$

$$V_i = v_{moy,i}$$

$$q_i = V_i \times S_i$$

$$Q = q_1 + q_2 + \dots + q_m$$

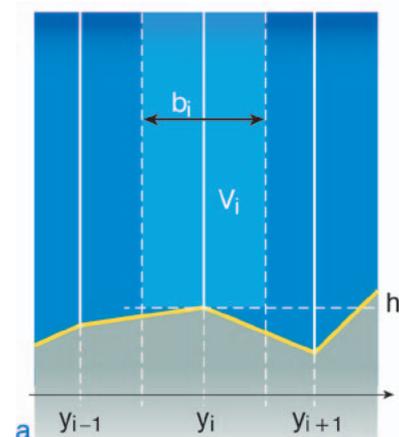


Fig. 4.9a - Méthodes de mesure du débit selon la section médiane.

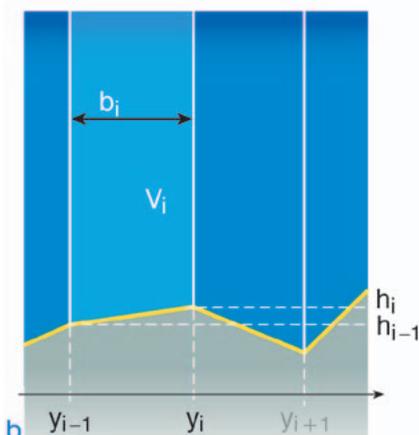


Fig. 4.9b - Méthodes de mesure du débit selon la section moyenne.

#### 4.4.2.2 Méthode de la section moyenne

La méthode de la section moyenne (ou « méthode des trapèzes »), considère que la moyenne des vitesses  $v_{moy}$  mesurées sur deux verticales consécutives est représentative de la vitesse de l'écoulement sur la sous-section délimitée par les deux verticales de mesure [→ fig. 4.9b].

La section transversale du cours d'eau est ainsi décomposée en un certain nombre de sous-sections trapézoïdales juxtaposées. La largeur  $b_i$  de chaque sous-section est égale à la distance entre deux verticales de mesure consécutives. La surface  $S_i$  de chaque sous-section sera considérée comme le produit de  $b_i$  et de la profondeur moyenne de ces deux verticales. On obtient donc :

$$S_i = b_i \times \frac{h_i + h_{i-1}}{2} = (y_i - y_{i-1}) \times \frac{h_i + h_{i-1}}{2}$$

$$V_i = \frac{v_{moy,i} + v_{moy,i-1}}{2}$$

$$q_i = V_i \times S_i$$

$$Q = q_1 + q_2 + \dots + q_{m+1}$$

#### → Exemple de calcul du débit à partir de mesures au courantomètre

Un jaugeage par exploration des vitesses à l'aide d'un courantomètre est dépouillé par la méthode de la section moyenne (ou méthode des trapèzes). Les mesures de vitesse sont présentées dans la fiche de jaugeage ci-dessous, et dépouillées dans le tableau page suivante.

Jaugeage par exploration du champ des vitesses au courantomètre

Nom du cours d'eau : RIVIERE  
Date : 01 / 04 / 2010  
Heure UTC+2 début : 07:00  
Heure UTC+2 fin : 08:30  
Hauteur échelle début : 0,23 m  
Hauteur échelle fin : 0,23 m  
Largeur de la section : 20,8 m  
Origine de la mesure RD  RG   
Abscisse d'origine : 0 cm  
Profondeur rive d'origine : 0 cm  
Profondeur rive de fin : 0 cm  
Matériel de mesure : Courantomètre C01  
Opérateurs : GD, JLC  
Moyenne :

N° Verticale	Distance à la rive (cm)	Profondeur (cm)	Position du capteur (cm)	Vitesse (m/s)
1	1,3	34	11	0,05
2	3	56	22	0,11
			45	0,15
3	4,5	64	13	0,20
			26	0,51
4	6	60	51	0,72
			12	0,85
5	7,5	58	24	0,55
			48	0,78
6	9	58	12	0,90
			23	0,69
7	10,5	58	46	0,89
			12	0,93
8	11,5	60	23	0,70
			46	0,89
9	12,5	56	12	0,95
			23	0,93
10	13,5	53	46	0,99
			12	1,13
11	15	50	23	0,93
			46	1,02
12	16,5	50	11	1,02
			22	1,15
13	18	40	44	0,91
			11	1,01
			22	1,01
			44	1,10
			11	0,85
			22	0,95
			44	1,02
			10	0,72
			20	0,80
			40	0,82
			10	0,75
			20	0,83
			40	0,95
			8	0,20
			46	0,12
			32	0,12

N° Archivage : GD. 2010. J. 001 Page 1 / 2

Jaugeage par exploration du champ des vitesses au courantomètre

Nom du cours d'eau : RIVIERE  
Date : 01 / 04 / 2010  
Heure UTC+2 début : 07:00  
Heure UTC+2 fin : 08:30  
Hauteur échelle début : 0,23 m  
Hauteur échelle fin : 0,23 m  
Largeur de la section : 20,8 m  
Origine de la mesure RD  RG   
Abscisse d'origine : 0 cm  
Profondeur rive d'origine : 0 cm  
Profondeur rive de fin : 0 cm  
Matériel de mesure : Courantomètre C01  
Opérateurs : GD, JLC  
Moyenne :

Distance à la rive (cm)	Profondeur (cm)	Position du capteur (cm)	Vitesse (m/s)
20	16	6	0,01

N° Archivage : GD. 2010. J. 001 Page 2 / 2

vert.	$y_i$	$h_i$	$z_1$	$u_1$	$z_2$	$u_2$	$z_3$	$u_3$	$v_{moy,i}$	$V_i$	$s_i$	$q_i$
$w_i$	m	cm	cm	m/s	cm	m/s	cm	m/s	m/s	m/s	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s
0	0,0	0							0,03			
1	1,3	34	14	0,05					0,05	0,04	0,22	0,01
2	3,0	56	11	0,11	22	0,15	45	0,20	0,15	0,10	0,77	0,08
3	4,5	64	13	0,51	26	0,73	51	0,85	0,71	0,43	0,90	0,39
4	6,0	60	12	0,55	24	0,78	48	0,90	0,75	0,73	0,93	0,68
5	7,5	58	12	0,69	23	0,89	46	0,93	0,85	0,80	0,89	0,71
6	9,0	58	12	0,70	23	0,89	46	0,95	0,86	0,855	0,87	0,74
7	10,5	58	12	0,76	23	0,99	46	1,13	0,97	0,915	0,87	0,80
8	11,5	60	12	0,93	23	1,02	46	1,15	1,03	1,00	0,59	0,59
9	12,5	56	11	0,91	22	1,01	44	1,10	1,01	1,02	0,58	0,59
10	13,5	53	11	0,85	22	0,95	44	1,02	0,94	0,975	0,55	0,53
11	15,0	50	10	0,72	20	0,80	40	0,82	0,79	0,87	0,77	0,67
12	16,5	50	10	0,75	20	0,83	40	0,85	0,82	0,81	0,75	0,60
13	18,0	40	8	0,20	16	0,12	32	0,12	0,14	0,48	0,68	0,32
14	20,0	16	6	0,01					0,01	0,075	0,56	0,04
15	20,8	0							0,006	0,008	0,06	5x10 <sup>-4</sup>

• **Calcul des vitesses moyennes sur les verticales :**

verticales 1 et 14 : formule simplifiée à 1 point :  $v_{moy} = v_{0,4}$

$$v_{moy,1} = 0,05 \text{ m/s}$$

$$v_{moy,14} = 0,01 \text{ m/s}$$

verticales de rives 0 et 15 : on suppose  $k_r = 0,8$

$$v_{moy,0} = (2k_r - 1)v_{moy,1} = (2 \times 0,8 - 1) \times 0,05 = 0,03 \text{ m/s}$$

$$v_{moy,15} = (2k_r - 1)v_{moy,14} = (2 \times 0,8 - 1) \times 0,01 = 0,006 \text{ m/s}$$

verticales 2 à 13 : formule simplifiée à 3 points :  $v_{moy} = 0,25 \times (v_{0,2} + 2v_{0,4} + v_{0,8})$

$$v_{moy,2} = 0,25 \times (0,11 + 2 \times 0,15 + 0,20) = 0,15 \text{ m/s}$$

$$v_{moy,3} = 0,25 \times (0,51 + 2 \times 0,73 + 0,85) = 0,71 \text{ m/s}$$

etc.

• **Calcul des vitesses moyennes sur les sous-sections :**  $V_i = (v_{moy,i-1} + v_{moy,i}) / 2$

$$V_1 = (0,03 + 0,05) / 2 = 0,04 \text{ m/s}$$

$$V_2 = (0,05 + 0,15) / 2 = 0,10 \text{ m/s}$$

etc.

• **Calcul de la surface des éléments de section correspondants :**  $s_i = (y_i - y_{i-1}) \times (h_i + h_{i-1}) / 2$

$$s_1 = (1,3 - 0) \times (0 + 0,34) / 2 = 0,22 \text{ m}^2$$

$$s_2 = (3,0 - 1,3) \times (0,34 + 0,56) / 2 = 0,77 \text{ m}^2$$

etc.

• **Calcul du débit pour chaque sous-section :**  $q_i = V_i S_i$

$$q_1 = 0,04 \times 0,22 = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_2 = 0,10 \times 0,77 = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$$

etc.

• **Calcul du débit total :**  $Q = q_1 + q_2 + \dots + q_{14}$

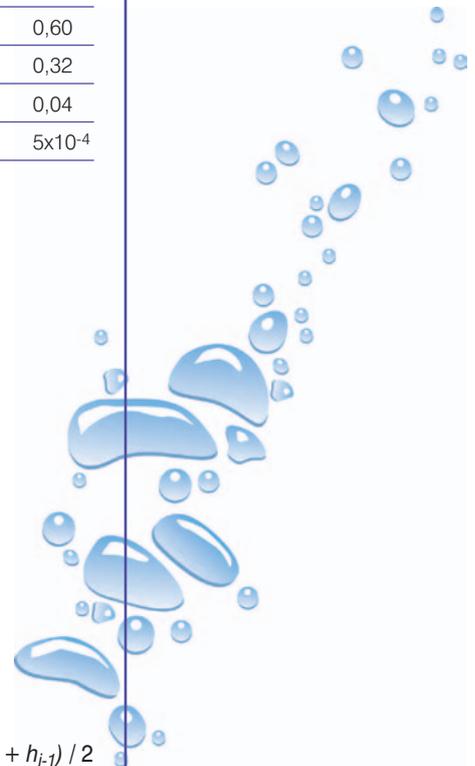
Résultat final présenté avec deux chiffres significatifs (arrondi par excès) :

$$Q = 6,8 \text{ m}^3/\text{s}$$

• **Calcul de la vitesse moyenne jaugée :**

$$\text{surface mouillée totale : } S = s_1 + s_2 + \dots + s_{14} = 10 \text{ m}^2$$

$$\text{vitesse moyenne jaugée : } V = Q / S = 6,8 / 10 = 0,68 \text{ m/s}$$



### 4.4.3 Logiciels pour le dépouillement des jaugeages

Le dépouillement des jaugeages au courantomètre peut s'effectuer sur ordinateur. L'utilisation de ces matériels permet de limiter les opérations manuelles et de rendre beaucoup plus rapide l'obtention du débit. L'usage d'un ordinateur portable donne la possibilité d'obtenir les résultats de débit directement sur le site. Cela ne dispense pas cependant de bien contrôler la vraisemblance des résultats obtenus ! Il convient d'être rigoureux lors de l'entrée des résultats de mesures et de bien suivre les indications du menu : attention notamment à ne pas inverser l'ordre des données entrées (abscisses et ordonnées des points de mesure) par rapport aux origines choisies (rive droite / rive gauche et surface / fond).

La liste de logiciels utilisés par différents services en France présentés dans cette partie n'est pas exhaustive. Leur point commun est la saisie des données issues de jaugeages par exploration du champ des vitesses, le calcul du débit par une méthode d'intégration, et la sauvegarde des composantes de ces jaugeages dans une base de données.

#### ■ Le logiciel Cassiopée-Moulinet

Le logiciel *Cassiopée-Moulinet* est un logiciel de calcul du débit développé pour le Conseil supérieur de la pêche (version de janvier 1996), et utilisé par les services de l'Onema. *Cassiopée-Moulinet* doit être remanié en 2011 pour s'adapter à l'évolution de l'informatique et des pratiques hydrométriques. Il permet une saisie rapide des jaugeages réalisés point par point, avec des courantomètres mécaniques (gestion des lois d'hélice), électromagnétiques et acoustiques (saisie des vitesses mesurées). Dans *Cassiopée-Moulinet* (2011), la vitesse moyenne sur chaque verticale est calculée obligatoirement par les formules algébriques de la norme NF EN ISO 748 (2007).

Le logiciel *Cassiopée-Moulinet* (1996) calcule une vitesse moyenne et une section mouillée dans l'espace compris strictement entre la première et la dernière verticale de mesure. Ce calcul est effectué selon la méthode des rectangles (section médiane, [→ § 4.4.2.1]). Des coefficients de rives [→ § 4.4.1.3] permettent de modifier les aires mouillées calculées entre la première verticale de mesure et la rive adjacente, et entre la dernière verticale de mesure et la rive adjacente. La somme des trois aires calculées donne la section mouillée totale. Le débit est le produit de cette section mouillée avec la vitesse moyenne calculée précédemment. Le logiciel *Cassiopée-Moulinet* (2011) calcule le débit au bord selon la norme NF EN ISO 748 (2007), à partir de la profondeur à la berge et d'un coefficient d'extrapolation de la vitesse en rive fixé par défaut ( $k_r = 0,86$ ). L'application permet d'éditer des rapports de jaugeage avec un graphique de la section et un en-tête rappelant les conditions du jaugeage [→ fig. 4.10].

#### ■ Le logiciel Bareme

Le logiciel *Bareme* (dernière mise à jour en juillet 2009) comprend deux modules principaux pour le dépouillement et la gestion des jaugeages par exploration du champ des vitesses, et pour la gestion et le tracé des courbes de tarage. Ce logiciel est développé et maintenu par la DREAL Rhône-Alpes, et largement utilisé par les unités d'hydrométrie des services de l'État. *Bareme* comprend de nombreuses options et une documentation complète. La vitesse moyenne sur chaque verticale est calculée par intégration soit par la méthode des trapèzes, soit par la méthode intégratrice [→ § 4.4.1.2]. Un coefficient de fond est appliqué aux profils de vitesse [→ § 4.4.1.2].

The screenshot displays the Cassiopée-Moulinet software interface with the following sections and data:

- Localisation:** Cours d'eau: Buëch; Lieu-dit: Pont D22; Repère: aval Pont; Commune: Aspres; Département: O5.
- Géolocalisation:** X: 1938.67; Y: 0870.47.
- Date et heure des mesures:** Date: 15/06/2010; Heure de début: 8:15; Heure de fin: 10:15.
- Origine des mesures:** Fond (selected), Surface, Rive gauche, Rive droite.
- Largeur de la section (m):** Valeur: 9.90.
- Hauteurs d'eau en rive:** Hauteur d'eau rive gauche (m): 0.1; Hauteur d'eau rive droite (m): 0.
- Nature du lit sur la section:** Dominant: Nature dominante 1.
- Verticales:** Distance rive (m): 4.5; Profondeur (m): 0.3; Durée (s): 10; Nombre de points de mesures: 3.
- Mesures sur la verticale:**

Position (m)	Vitesse (m/s)
0.06	0.13
0.12	0.38
0.24	0.41
- N° de verticale:** 4 (selected).
- Buttons: Supprimer, Ajouter verticale.

Fig. 4.10 - Exemple de sorties graphiques du logiciel Cassiopée-Moulinet

# Rapport de jaugeage

Cours d'eau	Buëch
Lieu-dit	Pont D22
Repère	100 m aval Pont D22
Commune	Aspres/Buëch
Département	05

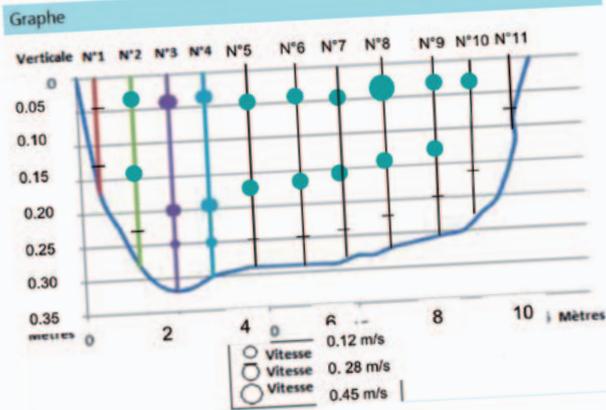
## I) Caractéristiques générales

Date et heure	
Date	15/06/2010
Heure Début	8h15
Heure Fin	10h15

Géolocalisation	
Latitude	
Longitude	
Description	

# Rapport de jaugeage

## III) Résultats du jaugeage



Débit total Q (m³/s) =	0.574 m³/s
Surface totale (m²) =	2.72 m²
Vitesse moyenne (m/s) =	0.211 m/s
Incertitude	0.517 m³/s < Q < 0.631 m³/s

# Rapport de jaugeage

## IV) Tableau des mesures

N°	Distance à Vert (m)	Distance à Rive (m)	Profondeur (m)	Durée (s)	Position (m)	Vitesse (m/s)	Vitesse (m/s)	Débit unitaire (m³/s)	N°	Distance à Vert (m)	Distance à Rive (m)	Profondeur (m)	Durée (s)	Position (m)	Vitesse (m/s)	Vitesse (m/s)	Débit unitaire (m³/s)
1	0.30	0.18	30		0.036	0.06	0.05	0.17	09	8.20	0.26	30		0.052	0.11	0.05	0.17
					0.15	0.08								0.104	0.19		
2	1.20	0.26	30		0.052	0.18	0.05	0.17	10					0.208	0.25		
					0.105	0.20				9.00	0.23	30		0.046	0.13	0.05	0.17
					0.208	0.24								0.184	0.22		
3	2.20	0.32	30		0.064	0.18	0.05	0.17	11	9.70	0.12	30		0.048	0.11	0.05	0.17
					0.128	0.21											
					0.256	0.25											
4	3.20	0.30	30		0.060	0.19	0.05	0.17	12	1.301	0.34	30				0.17	0.17
					0.120	0.24											
					0.240	0.29											
5	4.20	0.29	30		0.058	0.24	0.017	0.05	13	1.301	0.34	30				0.017	0.1717
					0.116	0.28											
					0.232	0.31											
6	5.20	0.29	30		0.058	0.27	0.017	0.05	14	1.301	0.34	30				0.017	0.05
					0.116	0.29											
					0.232	0.32											
7	1.301	0.34	30		0.058	0.28	0.017	0.05	15	1.301	0.34	30				0.017	0.05
					0.116	0.32											
					0.232	0.35											

Exemple de rapport de jaugeage édité à partir du logiciel Cassiopée-Moulinet (1996).

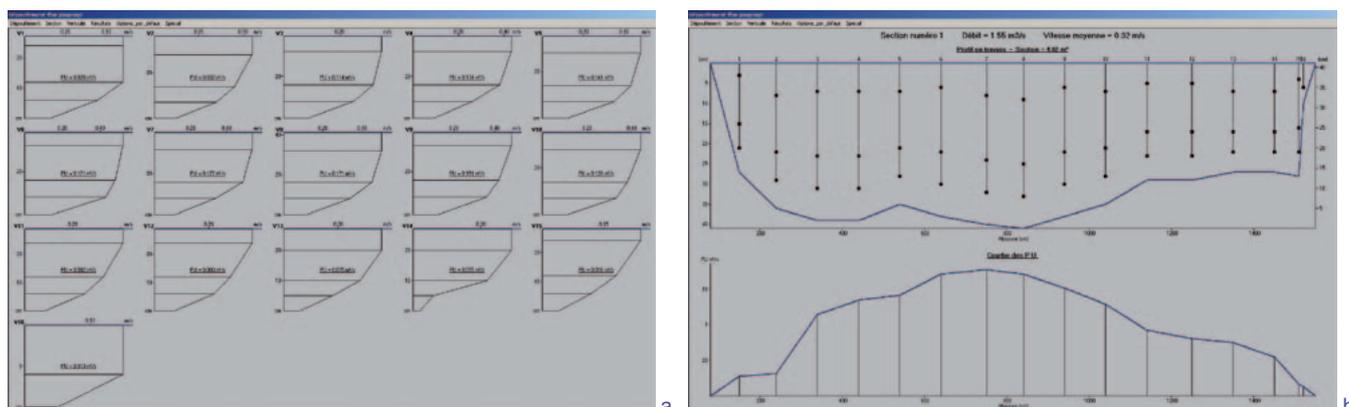
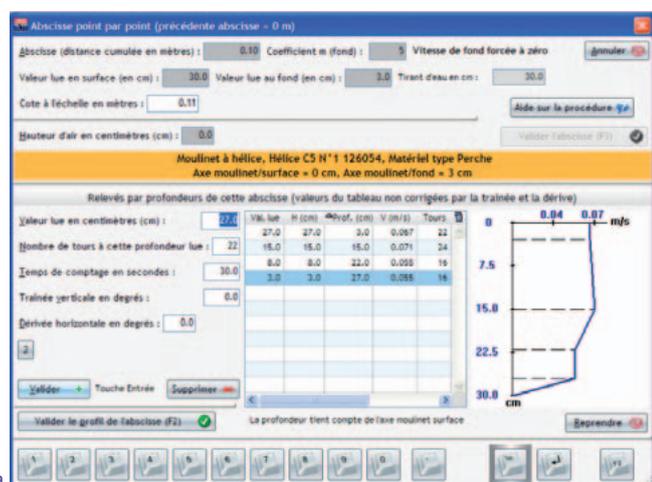


Fig. 4.11 - Exemple de sorties graphiques du logiciel *Bareme* (DREAL Rhône-Alpes) :

- (a) profils verticaux de vitesse ;  
 (b) géométrie de la section, position des mesures de vitesse, distribution des potentiels unitaires (débits par unité de largeur).

Avec le logiciel *Bareme*, le calcul du débit est réalisé par intégration des potentiels unitaires (débits par unité de largeur en chaque verticale) selon une méthode de section moyenne [→ § 4.4.2.2], ce qui revient mathématiquement à une méthode de section médiane classique [→ § 4.4.2.1] sur les vitesses. Des coefficients de rives [→ § 4.4.1.3] permettent d'extrapoler les vitesses dans les sous-sections de bord, la profondeur aux bords de section étant spécifiée par l'utilisateur. Le logiciel permet des sorties graphiques [→ fig. 4.11] et l'impression de rapports sur les composantes du jaugeage (données, graphiques, résultats).



### ■ Le logiciel Jasmine

Le logiciel *Jasmine* (dernière mise à jour en février 2009) a été développé en collaboration entre EDF-DTG et la société *Alcy*, en respectant un cahier des charges assurant en particulier la conformité au protocole de dépouillement utilisé par les services d'EDF. Il est distribué par la société *Ott*.

*Jasmine* propose une intégration des vitesses sur les verticales et la section selon un calage spline cubique. Ces méthodes sont également proposées en option par *Jasmine*, ce qui permet un dépouillement proche de celui de *Bareme*. On peut, ou non, recourir à des coefficients de fond [→ § 4.4.1.2] et de bords [→ § 4.4.1.3] définis selon la norme NF EN ISO 748 (2007)). Des exemples de visualisations graphiques sont présentés ci-contre [→ fig. 4.12]. Les graphiques et tableaux de données peuvent être exportés et imprimés pour éditer des rapports de jaugeage. Des évolutions sont en cours d'étude, notamment sur les problèmes d'incertitude.

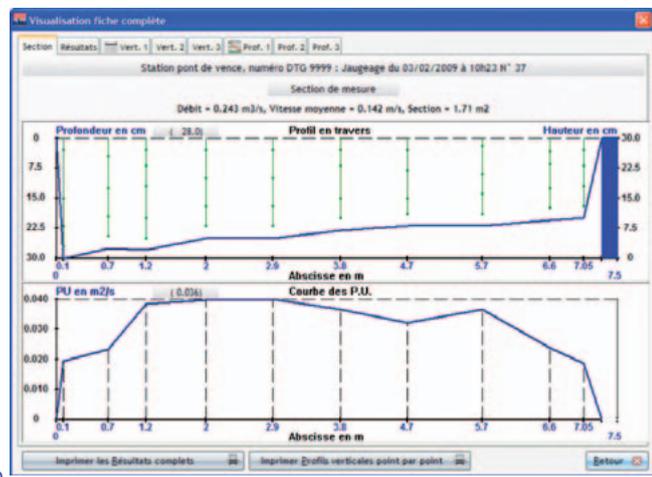
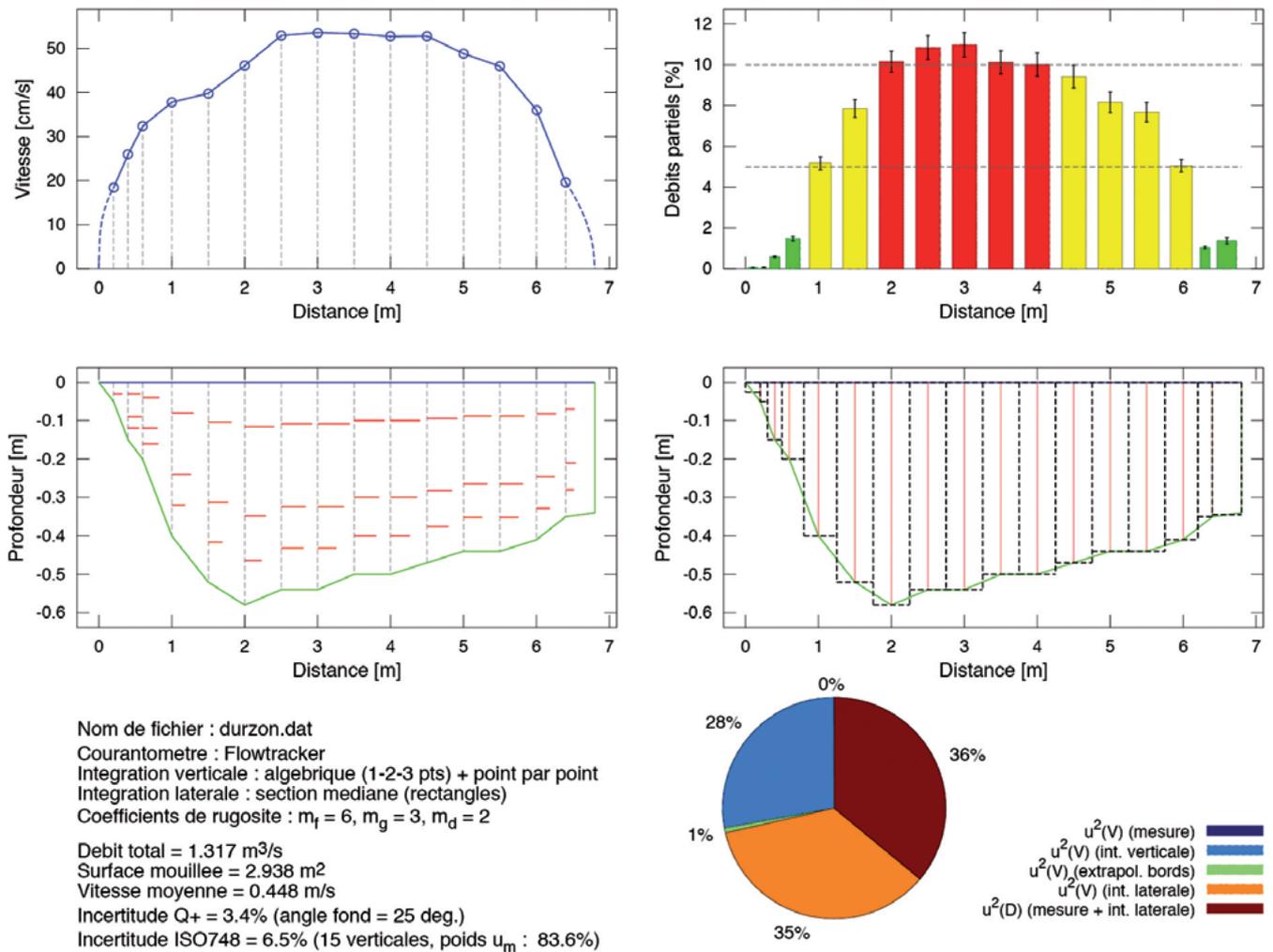


Fig. 4.12 - Exemple de sorties graphiques du logiciel *Jasmine* (Ott) :

- (a) saisie d'une verticale de mesure ;  
 (b) géométrie de la section, position des mesures de vitesse, distribution des potentiels unitaires (débits par unité de largeur).



### ■ Le logiciel Q+

Le logiciel Q+ (2011) développé en environnement *GNU Octave* par le Cemagref permet de tester différentes options de calcul du débit et des incertitudes associées, dans le cadre de recherches en hydrométrie. Il n'est pas diffusé à l'opérationnel, mais permet d'élaborer des propositions d'améliorations des logiciels opérationnels. Il permet des exports graphiques [→ fig. 4.13]. Un module de calcul d'incertitude généralisé a été implémenté 2010.

Fig. 4.13 - Exemple de sortie graphique du logiciel Q+ (Cemagref).

À gauche, géométrie de la section, mesures de vitesse ponctuelles (vecteurs) et distribution de  $v_{moy}$ .

À droite, géométrie de la section, sous-sections obtenues par la méthode de la section médiane, distribution des débits partiels  $Q_i$  par sous-section (code couleur : vert si  $Q_i < 5\% Q$ , jaune si  $5 < Q_i < 10\% Q$ , rouge si  $10 < Q_i < 15\% Q$ , noir si  $Q_i > 15\% Q$ ).

En bas, rapport de dépouillement et estimation des incertitudes.

## 4.5 Calcul d'incertitude

### 4.5.1 Calcul détaillé

→ Se référer à la section 2.4 pour les notations et principes du calcul d'incertitude.

La norme NF EN ISO 748 (2007) propose une méthode de calcul d'incertitude<sup>15</sup>, que l'on applique ici de façon simplifiée, en reprenant les notations de Herschy (2002) pour conformité au GUM (NF ENV 13005, 1999). Ce calcul peut être automatisé dans certains logiciels de dépouillement de jaugeage par exploration des vitesses. Il peut ainsi être mené verticale par verticale, et non en moyenne sur la section de jaugeage comme dans les exemples à suivre.

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 :

$$u'_{Q^2} = u'_s{}^2 + u'_m{}^2 + \frac{1}{m} \left[ u'_b{}^2 + u'_h{}^2 + u'_p{}^2 + \frac{1}{n} (u'_c{}^2 + u'_e{}^2) \right]$$

avec les composantes d'incertitude suivantes :

- $u'_s$  : incertitude due aux erreurs systématiques (étalonnage) du courantomètre, et des instruments de mesure des largeurs et des profondeurs ;
- $u'_m$  : incertitude due au nombre limité  $m$  de verticales (erreur d'intégration des profondeurs et vitesses sur la largeur) ;
- $u'_b$  : incertitude due à la mesure des largeurs entre verticales ;
- $u'_h$  : incertitude due à la mesure des tirants d'eau sur les verticales ;
- $u'_p$  : incertitude due au nombre de points limité sur la verticale (erreur d'intégration des vitesses sur la hauteur d'eau) ;
- $u'_c$  : incertitude due aux erreurs aléatoires du courantomètre ;
- $u'_e$  : incertitude due au temps limité d'exposition du courantomètre (moyenne des fluctuations de vitesse).

Les différentes composantes d'incertitude sont évaluées à partir des valeurs indicatives données dans l'Annexe E de la norme NF EN ISO 748 (2007). Ces valeurs tabulées peuvent être interpolées linéairement. Elles peuvent également être réévaluées à partir des certificats d'étalonnage, spécifications techniques et rapports d'essais disponibles. On retiendra les estimations suivantes synthétisées dans le tableau 4.5 :

$u'_s$	$u'_s = 1 \%$				
$u'_m$	5 verticales $u'_m = 7,5 \%$	10 verticales $u'_m = 4,5 \%$	15 verticales $u'_m = 3 \%$	20 verticales $u'_m = 2,5 \%$	
$u'_b$	$u'_b = 0,5 \%$				
$u'_h$	$u'_h = 0,5 \%$				
$u'_p$	1 point $u'_p = 7,5 \%$	2 points $u'_p = 3,5 \%$	3 points $u'_p = 3 \%$	5 points $u'_p = 2,5 \%$	
$u'_c$	$V = 0,03 \text{ m/s}$ $u'_c = 10 \%$	$V = 0,10 \text{ m/s}$ $u'_c = 2,5 \%$	$V = 0,15 \text{ m/s}$ $u'_c = 1,25 \%$	$V = 0,25 \text{ m/s}$ $u'_c = 1 \%$	$V \geq 0,50 \text{ m/s}$ $u'_c = 0,5 \%$
	Voir spécifications techniques ou rapport d'étalonnage du courantomètre				
$u'_e$	Voir spécifications techniques ou rapport d'étalonnage du courantomètre				

Tabl. 4.5 - Estimation des incertitudes pour un jaugeage par exploration du champ des vitesses.

15 - Attention : les valeurs d'incertitudes indiquées dans les annexes de la norme NF EN ISO 748 (2007) ne sont valables que dans les conditions d'application du jaugeage définies dans la norme, et pour certains types de courantomètres mécaniques. En particulier, le débit associé à une verticale ne doit pas dépasser 5 à 10 % du débit total. Toutefois, cette norme présente des incohérences, puisqu'elle indique des nombres de verticales inférieurs à 10 pour les petites sections, et propose également des valeurs d'incertitudes associées à des nombres de verticales inférieurs à 10... Une méthode de calcul plus directe permettant de généraliser le calcul d'incertitude proposé par la norme NF EN ISO 748 (2007) fait défaut actuellement dans la normalisation.

- Herschy (2002) recommande de prendre par défaut  $u'_s = 1 \%$ .
- $u'_m$  est indiquée dans le tableau E.6 de la norme NF EN ISO 748 (2007) pour un nombre de verticales  $m = 5$  à 45 par pas de 5. Ces valeurs sont appropriées pour un jaugeage réalisé sur une section naturelle selon les prescriptions de la norme NF EN ISO 748 (2007). Dans le cas typique d'un jaugeage réalisé sur une section calibrée étroite avec une distribution transversale des vitesses très régulière (cas d'un canal maçonné étroit), un nombre réduit de verticales n'introduit pas autant d'incertitude qu'indiqué dans la norme. En attendant une méthode de calcul des incertitudes plus généralisable, il convient d'évaluer un nombre raisonnable de verticales fictives à placer dans les sous-sections sans variation significative de géométrie et de vitesse, de manière à ré-évaluer l'incertitude  $u_m$  à partir de la norme. Ces sous-sections étant généralement situées dans la partie centrale de l'écoulement, il faut tout de même resserrer les verticales de mesure aux bords, de manière à mesurer les variations transversales de vitesse.
- $u'_p$  dépend du nombre de points sur la verticale, considéré ici en moyenne sur tout le jaugeage (tableau E.4 de la norme NF EN ISO 748 (2007)).
- $u'_c$  dépend de la vitesse mesurée, considérée ici en moyenne sur tout le jaugeage (tableau E.5 de la norme NF EN ISO 748 (2007)). Les valeurs données dans le tableau 4.5 sont prévues pour des courantomètres mécaniques (moulinets), et sont vraisemblablement surestimées pour des courantomètres électro-magnétiques, et surtout pour des courantomètres acoustiques. Se référer aux spécifications techniques du constructeur ou au dernier rapport d'étalonnage.
- $u'_e$  dépend de la durée d'exposition, de la profondeur de mesure et de la vitesse mais surtout du courantomètre utilisé. Le tableau E.3 de la norme NF EN ISO 748 (2007) donne des valeurs pour un certain type de moulinet à hélice. Il est donc recommandé de se référer aux spécifications techniques du constructeur ou au dernier rapport d'étalonnage pour évaluer l'incertitude  $u_e$  correspondant au courantomètre utilisé.

#### → Exemple de calcul d'incertitude sur un jaugeage par courantomètre

On reprend l'exemple de jaugeage par exploration des vitesses présenté plus haut et réalisé à l'aide d'un courantomètre électro-magnétique *Nautilus Ott*.

L'équation de la page précédente est appliquée avec les valeurs de composantes d'incertitude suivantes :

- $u'_s = 1 \%$  (par défaut pour un moulinet correctement étalonné) ;
- $u'_m = 3 \%$  pour  $m = 14$  verticales ;
- $u'_b = 0,5 \%$  (par défaut pour une mesure soignée des largeurs entre verticales) ;
- $u'_h = 0,5 \%$  (par défaut pour une mesure soignée des tirants d'eau sur les verticales) ;
- $u'_p = 3 \%$  pour 3 points sur la plupart des verticales ;
- $u'_c = 0,5 \%$  pour  $V \approx 0,70$  m/s ;
- $u'_e = 1 \%$  (« précision » indiquée par le constructeur).

L'incertitude-type combinée sur le débit est obtenue par :

$$u'_{Q^2} = 1^2 + 3^2 + 1/14 [0,5^2 + 0,5^2 + 3^2 + 1/3 (0,5^2 + 1^2)]$$

$$u'_{Q^2} = 10,7$$

$$\text{D'où } u'_Q = 3,3 \%$$

Au final, on obtient une incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) sur le débit  $U'_Q = 6,5\%$ , soit  $U_Q = 0,5$  m<sup>3</sup>/s.

On exprime le résultat comme suit :

$$Q = 6,8 \text{ m}^3/\text{s} \pm 0,5 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (niveau de confiance à 95 \%, } k = 2)$$



## 4.5.2 Estimation rapide

En pratique, la répétition d'un jaugeage par courantomètre ne peut généralement pas être évaluée en raison de la durée de mise en œuvre.

Pourvu que le déploiement respecte le protocole type, que le courantomètre soit correctement étalonné ou vérifié, que la section de jaugeage réponde aux impératifs, et qu'au moins trois points soient mesurés par verticale, l'incertitude provient essentiellement du nombre limité de verticales de mesure utilisées [→ norme NF EN ISO 748, 2007]. Cette incertitude est limitée par un placement judicieux des verticales <sup>16</sup> (ce qui suppose un jaugeur expérimenté et connaissant bien la section).

Il faut que le débit partiel pour chaque verticale n'excède pas 5 à 10 % du débit total, d'où un minimum de 10 à 20 verticales de mesure, tout en maintenant une durée de jaugeage raisonnable par rapport aux variations de régime hydraulique en cours de jaugeage.

Si le niveau d'eau a varié sensiblement entre le début et la fin du jaugeage, il faut considérer que l'incertitude-type  $u_Q$  ne peut être inférieure à l'écart de débit correspondant (estimé à partir d'une courbe de tarage par exemple), divisé par  $2\sqrt{3}$  (hypothèse d'une loi de distribution rectangulaire [→ NF ENV 13005, 1999]).

Rappel : l'incertitude élargie finale (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) dont il faut assortir la mesure de débit vaut :

$$U'_Q = 2 \times u'_Q \text{ (en \%)}$$

Dans les bonnes conditions d'application, avec un appareil correctement étalonné, l'incertitude globale élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) est sensiblement égale à l'incertitude liée au nombre limité de verticales. Dans ces conditions, on peut donc évaluer rapidement l'incertitude globale élargie  $U'_Q$  à partir des valeurs types issues de l'abaque Annexe E de la norme NF EN ISO 748 (2007), selon le nombre de verticales :

- 5 verticales →  $U'_Q = 15 \%$
- 10 verticales →  $U'_Q = 9 \%$
- 15 verticales →  $U'_Q = 6 \%$
- 20 verticales →  $U'_Q = 5 \%$

Rappel : dans le cas d'un jaugeage sur une section calibrée étroite, il faut ajouter un nombre de verticales fictives pour tenir compte des erreurs réduites sur les sous-sections sans variation significative de géométrie et de vitesse. Typiquement, dans le cas du jaugeage en section étroite et profonde (illustré [→ fig. 4.6b] avec 7 verticales à 5 points de mesure de vitesse chacune, conformément aux recommandations du § 4.3.2.3), si la vitesse moyenne ne varie pas significativement entre les verticales 2 et 6, on peut ajouter 4 à 6 verticales fictives, ce qui permet d'estimer  $U'_Q \approx 7 - 8 \%$ .

## 4.5.3 Valeurs usuelles

On retiendra les valeurs suivantes, usuellement rencontrées pour l'incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) :

- dans les bonnes conditions d'application, un jaugeage par courantomètre en régime permanent est considéré incertain à 7 % ;
- en conditions plus défavorables, l'incertitude peut monter à 15 %, et plus dans le cas d'un appareil mal étalonné ou d'un régime hydraulique variable (débit indicatif entaché d'incertitudes de 20 à 30 %).

16 - Certaines méthodes de dépouillement (méthode dite japonaise, non présentée ici) permettent même le levé de profondeurs sur des verticales supplémentaires, pour mieux caractériser la bathymétrie sans perdre trop de temps.

C'est notamment le cas lorsque l'on utilise un courantomètre mécanique (moulinet ou micromoulinet) dans sa gamme de vitesse basse, pour laquelle les incertitudes sur la mesure de vitesse augmentent très fortement. Face à un écoulement très lent, le courantomètre utilisé doit être adapté : choix de la taille de moulinet, privilégier les courantomètres électro-magnétiques et surtout Doppler qui présentent des incertitudes réduites à faible vitesse.

Dans le cas d'un contrôle, et dans les bonnes conditions d'application avec un appareil correctement étalonné/vérifié et adapté à l'écoulement mesuré, on retiendra par précaution une valeur de  $U'_Q = 10\%$  pour au moins 11 à 15 verticales sur section large [→ § 4.3.2.2], ou au moins 6 verticales sur section étroite et profonde [→ § 4.3.2.3], avec au moins 30 points de mesure de vitesse au total dans chaque cas.

Les valeurs usuelles et limites de l'incertitude élargie  $U'_Q$  sont résumées dans le tableau comparatif Annexe B pour chaque méthode de jaugeage.



# Exploration du champ des vitesses

## Les profileurs Doppler

# 5

### 5.1 Principe de la mesure par ADCP

Ce chapitre présente une synthèse sur le jaugeage par profileur Doppler ADCP. Le lecteur est renvoyé au *Guide pratique ADCP* [Le Coz et al., 2008] pour plus de détails sur cette technique, plutôt adaptée aux grands cours d'eau mais pouvant être également efficace pour le contrôle de débit sur des écoulements réguliers et des sections larges. Un groupe d'utilisateurs francophones, le groupe Doppler existe depuis 2005.

Un ADCP (profileur acoustique de courant à effet Doppler) immergé à la surface de l'écoulement effectue rapidement des mesures de profondeur et de vitesses sur toute la verticale. 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 profondeur 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.

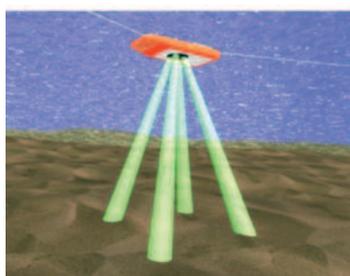
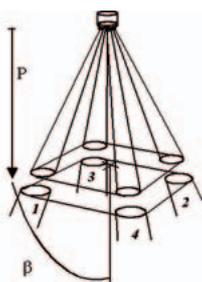


Fig. 5.1 - Configuration classique d'un ADCP à quatre faisceaux.



La fréquence des ultrasons émis varie selon les modèles de 300 à 3 000 kHz typiquement. Les faisceaux de l'ADCP sont généralement divergents et disposés symétriquement [→ fig.5.1].

En général, une mesure de température de l'eau permet de calculer la vitesse de propagation du son dans l'eau. Si l'ADCP ou son support 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 ou géographique. Dans le cas d'un suivi de fond, les données d'orientation par compas interne par exemple ne sont pas nécessaires au calcul du débit. Il est souvent possible de coupler l'ADCP à un système de positionnement externe (GPS) ou à un sondeur acoustique.

Un jaugeage par ADCP peut se pratiquer selon deux types de déploiement : mobile ou stationnaire (verticale par verticale). Dans les deux cas l'appareil est maintenu à la surface de l'écoulement sur un support flottant ou une potence.

#### 5.1.1 Jaugeage par ADCP mobile

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*). Cette méthode suppose que le fond du cours d'eau est immobile.

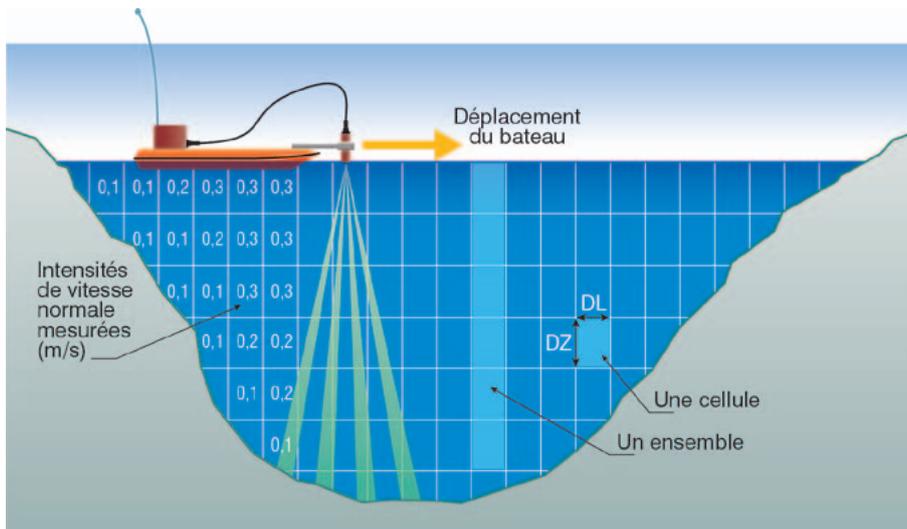


Fig. 5.2 - Jaugeage par ADCP mobile.

L'ADCP est déplacé continuellement 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 de mesure [→ fig.5.2].

Il est recommandé d'effectuer au moins six traversées successives fournissant chacune un débit individuel et de retenir le débit moyen, à condition qu'aucun des débits individuels ne s'écarte de plus de 5 % de la moyenne.

Il est important de noter que pour ce type de déploiement mobile avec suivi de fond, le débit mesuré ne dépend pas des données du compas.

### 5.1.2 Jaugeage par ADCP stationnaire

Dans le cas d'un jaugeage par ADCP stationnaire, l'appareil est maintenu fixe sur un certain nombre de verticales en travers de la section, selon un protocole identique au cas des courantomètres.

Le débit est calculé par intégration des vitesses sur la section, selon une méthode de calcul similaire au jaugeage par exploration des vitesses classique. Les mesures peuvent être dépouillées avec les logiciels constructeurs, ou éventuellement avec les mêmes logiciels que pour les courantomètres.

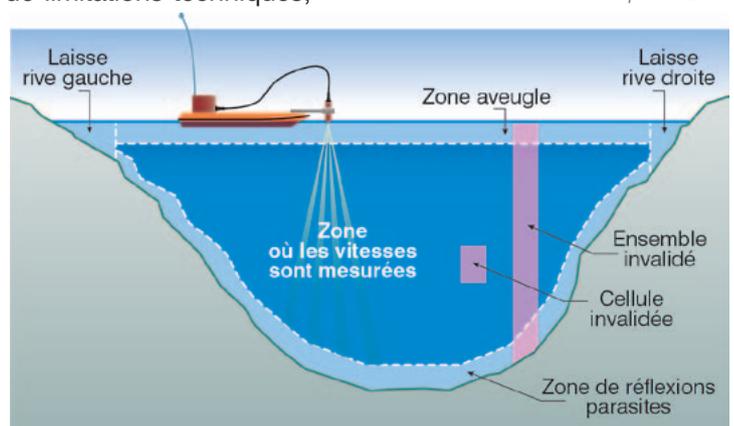
### 5.1.3 Estimation des débits non mesurés

Quel que soit le mode de déploiement, en raison de limitations techniques, l'ADCP ne peut pas mesurer les vitesses dans certaines zones de la section [→ fig.5.3] :

- la partie supérieure des profils, sur 5 cm à 1 m ;
- la partie inférieure des profils, près du fond ;
- les bords près des rives, par manque de profondeur ;
- les zones où les mesures ADCP ont été invalidées.

Sur toutes ces zones de la section sans mesures de vitesse, les débits partiels doivent être estimés par extrapolation des vitesses mesurées. Les lois d'extrapolation les plus courantes sont détaillées

Fig. 5.3 - Parties de la section non mesurées par l'ADCP.



dans le *Guide pratique ADCP* [Le Coz et al., 2008]. Le choix des paramètres d'extrapolation est à adapter aux conditions d'écoulement, en fonction des options disponibles dans le logiciel utilisé.

Le débit total jaugé par ADCP ( $Q_{total}$ ) est donc la somme d'un débit réellement mesuré par l'appareil ( $Q_{mesuré}$ ) et de débits extrapolés au niveau des bords, du haut et du bas de la section. Le ratio  $Q_{mesuré} / Q_{total}$  (%) est un critère important de qualité d'une mesure de débit sur une traversée ADCP. Un ratio  $Q_{mesuré} / Q_{total}$  convenable est proche de 70 %. Si ce ratio est inférieur à 50 %, une analyse poussée des profils de vitesse et des conditions d'écoulement devient nécessaire pour s'assurer de la validité des extrapolations de débit et donc du jaugeage.

### 5.1.4 Limitations techniques

La mesure par ADCP peut également être compromise par des problèmes liés aux conditions de mesure :

- présence de végétation ou d'objets divers encombrant le fond de la section. On peut envisager de nettoyer le fond, mais le mieux est, si possible, de changer de section ;
- proximité de parois ou obstacles entraînant des réflexions parasites ou l'interception des faisceaux (cas de sections étroites, comme des canaux d'irrigation par exemple) ;
- faibles profondeurs du fait des zones aveugles en haut et bas de profil vertical, ce qui peut être limitant pour un grand nombre de cours d'eau contrôlés en période d'étiage. Il est en effet recommandé d'avoir au moins trois mesures de vitesse valides sur chaque verticale, et un ratio débit mesuré / débit total supérieur à 50 % et proche de 70 % idéalement [→ section 5.1.3] ;
- présence de tourbillons, courants de retour, et tout écoulement irrégulier à proximité d'un ouvrage ou d'une prise d'eau par exemple ;
- trop ou trop peu de matières en suspension. Les corps flottant entre deux eaux, débris végétaux, poissons, etc., réfléchissent les ultrasons et peuvent perturber la mesure ;
- présence de bulles d'air, notamment à l'aval des seuils, derrière les piles de pont, dans les torrents de montagne, à proximité des moteurs de bateau ou dans leur sillage, etc. ;
- non respect d'une période de mise en température de l'appareil (une dizaine de minutes). Une erreur de température de 5 °C entraîne une erreur de vitesse de l'ordre de 1 % ;
- présence de masses ferro-magnétiques, susceptibles de fausser les mesures du compas interne. Quelques exemples rencontrés : rideau de pal-planche, grille de prise d'eau, béton fortement armé... mais aussi moteur du bateau ;
- écart systématique entre les débits jaugés de la rive droite à la rive gauche et ceux jaugés dans l'autre sens. L'écart est en général peu significatif (quelques % du débit), et la solution la plus commode est de l'éliminer en moyennant autant de traversées dans chaque sens pour établir le débit final ;
- un fond mobile, sous l'effet d'un transport de sédiments, fausse la mesure des vitesses et du débit dans le cas où on utilise le suivi de fond. Il est possible de détecter et corriger cet effet [cf. Le Coz et al., 2008].



## 5.2 Matériel

### 5.2.1 Profileurs Doppler

Les caractéristiques des modèles de profileurs Doppler les plus répandus sont résumées ci-dessous [→ tabl.5.1], à partir des informations fournies par les constructeurs.

Constructeur	Modèle	Fréquence des ultrasons [kHz]	Profondeur maximale [m]	Nombre et configuration des faisceaux	Compas et inclinomètres
T-RDI	WorkHorse	600	100	4, config. Janus ( $\beta = 20^\circ$ )	Oui
	RioGrande	1 200	26		
	StreamPro	2 400	2 - 4		
	RiverRay	600	40		
SonTek	ADP	500	70 - 120	3 ( $\beta = 25^\circ$ ), options à 2 ou 4 faisceaux	Oui (cas du River Surveyor)
	MiniADP	1 000	25 - 40		
		1 500	15 - 25		
		3 000	3 - 6		
	S5	3 000	5		
	M9	3 000 / 1 000	5	2 x 4, config. Janus ( $\beta = 25^\circ$ ) + 1 vertical (bathy, 1MHz)	Oui
NorTek	Qliner	1 000	-	2 ( $\beta = 25^\circ$ ) + 1 ( $\beta = -20^\circ$ )	Oui
		2 000	-		
LinkQuest	FlowQuest	300	230	4, config. Janus ( $\beta = 22^\circ$ )	Oui
		600	100		
		1 000	40		

A l'heure actuelle, la plupart des profileurs Doppler du marché sont commercialisés par Teledyne RDI, SonTek/YSI, Ott/Qmetrix/Nortek, et LinkQuest. En 2009, de nouveaux profileurs sont introduits sur le marché français par SonTek/YSI (S5 et M9) et Teledyne RDI (RiverRay).

Certains profileurs [→ fig.5.4] ont été développés spécifiquement pour le jaugeage des cours d'eau peu profonds (0,3 à 3 m typiquement). Ces profileurs présentent une tête de taille réduite afin de limiter la perturbation de l'écoulement. Ils fonctionnent à fréquence d'ultrasons élevée, pour une portée plus limitée et une dispersion des vitesses mesurées moindre.

Tabl. 5.1 - Caractéristiques des ADCP commerciaux les plus courants. Les appareils les plus adaptés aux sections peu profondes rencontrées lors des contrôles de débit minimal sont ceux présentant des fréquences d'ultrasons d'au moins 2 000 kHz.

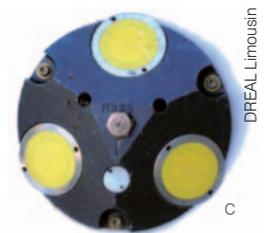


Fig 5.4 - Profileurs pour faibles tirants d'eau  
 a : StreamPro® TRDI 2400 kHz ;  
 b : Mini-ADP® SonTek 3000 kHz sur montage RiverCat ;  
 c : trimaran OceanScience ;  
 d : kit intégré Qliner® NorTek/Qmetrix 1000 ou 2000 kHz.

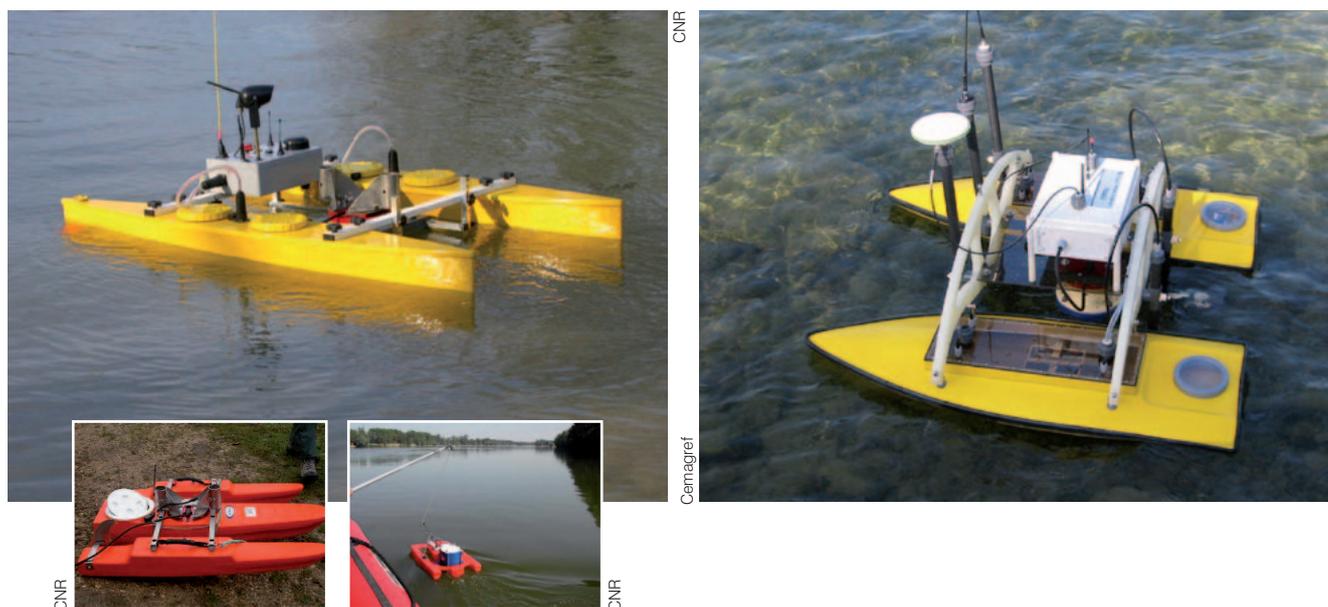


Fig. 5.5 - Exemples de supports d'ADCP tractés ou radiocommandés.

## 5.2.2 Supports

Lors de son déploiement, l'ADCP peut être solidaire d'un bateau, ou bien monté sur un support flottant autonome [→ fig.5.5]. Dans ce cas, il peut être maintenu et tracté à l'aide de cordes (depuis un pont ou en travers de la rivière), ou bien motorisé et radiocommandé (l'intérêt principal étant de choisir plus librement la section de mesure, en s'affranchissant des ponts notamment).

Il est recommandé de maintenir le flotteur le plus horizontal possible et orienté dans une direction à peu près constante, surtout lorsque l'ADCP n'est pas équipé d'inclinomètres ni de compas.

Selon les conditions d'intervention, le support et le mode de déplacement de l'appareil peuvent influencer fortement la qualité de la mesure. Des mouvements les plus lents et réguliers possibles sont préconisés, ainsi qu'une minimisation du tangage et du roulis. Une synthèse des modes de déploiement les plus courants est présentée ci-dessous [→ tabl.5.2].

Tabl. 5.2 - Synthèse des modes de déploiement ADCP.

	Avantages	Inconvénients
<b>Planche tractée par cordes</b>	Peu onéreux, léger	Problèmes de stabilité, à réserver aux faibles vitesses ou démonstration
<b>Trimaran léger tracté par cordes</b>	Léger, plus stable	Pas de motorisation, structure légère pouvant vriller, vitesses moyennes
<b>Catamarans radiocommandés</b>	Plus robustes et modulaires, déploiement autonome, versions non motorisées	Plus lourds, vitesses moyennes en fonction de la motorisation et de l'autonomie, pilotage délicat
<b>Barque sécurité</b>	Faible tirant d'eau et mise à l'eau facile	Motorisation limitée et maximum trois personnes à bord
<b>Zodiac</b>	Meilleure motorisation et maniabilité	Prévoir coque rigide à cause des corps flottants ou des berges avec enrochement
<b>Vedette</b>	Intérêt en crue, sur rivière navigable	Disponibilité des rampes de mise à l'eau

## 5.3 Mode opératoire

### 5.3.1 Consignes générales

De façon générale, le choix du site à jauger doit respecter les bonnes pratiques hydrométriques habituelles. Les critères suivants sont à prendre en considération :

- section régulière ;
- écoulement régulier ;
- profondeur adaptée au capteur et à l'embarcation retenue ;
- si possible éviter les bulles d'air, la végétation et les courants de retour.

Il est important de noter, soit sur la fiche terrain soit au sein du logiciel d'acquisition, toutes les conditions de mesures :

- nature de l'écoulement (état de la surface, corps flottant, turbidité, bulles d'air...) ;
- nature du fond (type de matériaux, présence éventuelle de végétation) ;
- évolution du niveau d'eau soit à partir d'une échelle existante, soit à partir d'une échelle provisoire installée pour l'occasion ;
- identification des opérateurs et du matériel utilisé ;
- tout facteur pouvant influencer sur la qualité de la mesure.

### 5.3.2 Vérifications du matériel avant mesure

Après mise à l'eau de l'embarcation (bateau ou support flottant), il convient de vérifier :

- l'état des batteries ;
- la communication de l'ADCP et de ses accessoires avec le PC d'acquisition ;
- la date et l'heure du PC et ADCP ;
- l'emplacement des données de résultats sur le PC ;
- la disponibilité des fiches terrain avec leur crayon à papier ;
- la mise en œuvre des consignes de sécurité en fonction du site ;
- la disponibilité et le bon état des équipements de sécurité ;
- la stabilisation de la mesure de température faite par l'ADCP ;
- la profondeur d'immersion du capteur (centre des céramiques) ;
- éventuellement, le bon réglage du compas interne.

### 5.3.3 Conduite de la campagne de mesure

Dans le cas d'un déploiement mobile, si l'on suspecte un fond mobile, un premier aller-retour sans arrêter l'enregistrement est préconisé [cf. *Le Coz et al., 2008*].

Dans le cas d'un écoulement stable, une série de traversées sera acquise de manière à établir un débit moyen. Il est conseillé de réaliser autant de transects rive droite vers rive gauche que l'inverse (de façon à éliminer un éventuel biais directionnel). Quatre transects est un nombre minimal, en conditions parfaitement stationnaires, pour constituer une série de jaugeage. Un minimum de six transects est préconisé en routine. Ce nombre pourra être augmenté si les valeurs de chaque transect présentaient de fortes disparités (écart à la moyenne supérieur à 10 %).



## 5.4 Dépouillement et critique des mesures

### 5.4.1 Inspection des données

Lors du dépouillement des données au bureau, il est important d'observer la présence ou non de cellules ou ensembles invalidés, et de vérifier que le profil n'est pas tronqué tant en profondeur qu'en largeur. Deux exemples de sorties graphiques de logiciels constructeurs sont donnés pour un jaugeage mobile [→ fig.5.6] et pour un jaugeage stationnaire, ou « verticale par verticale » [→ fig.5.7].

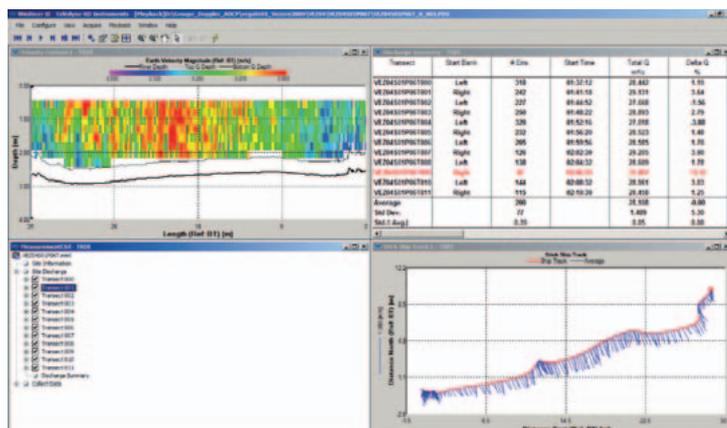


Fig. 5.6 - Exemple de sortie graphique pour un jaugeage ADCP mobile (logiciel WinRiver2, Teledyne RD).

graphiques de logiciels constructeurs sont donnés pour un jaugeage mobile [→ fig.5.6] et pour un jaugeage stationnaire, ou « verticale par verticale » [→ fig.5.7].

Les paramètres intervenant dans le calcul du débit sont :

- l'enfoncement du capteur ;
- les laisses ou distances aux bords ;
- la loi d'extrapolation du débit à chaque bord ;
- la loi d'extrapolation du débit de surface et de fond ;
- la méthode d'extrapolation des cellules ou ensembles invalidés (*bad*).

En cas de doute sur les paramètres de mesure, le plus simple consiste à :

- vérifier que ces paramètres ou choix d'extrapolation sont valides ;
- tester leur sensibilité pour valider les choix ;
- quantifier leur importance par rapport au débit total.

### 5.4.2 Établissement du débit moyen

La valeur finale du débit jaugé pendant la campagne est la moyenne des débits sur tous les transects jugés valides.

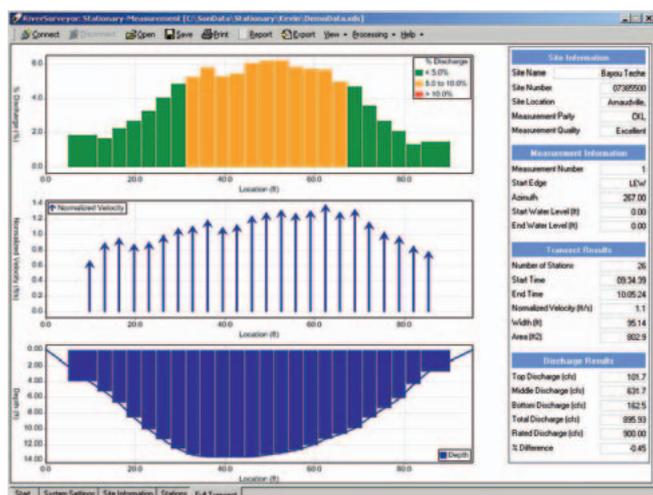


Fig. 5.7 - Exemple de sortie graphique pour un jaugeage ADCP stationnaire (logiciel StationaryMeasurement, SonTek/YSI).

Une traversée ne peut être exclue du calcul sans justification circonstanciée et objective, par exemple :

- forte présence de cellules ou ensembles invalidés ;
- perturbation transitoire rapide et ponctuelle ;
- mauvais paramétrage de l'ADCP, débouchant notamment sur un profil tronqué, ou des vitesses anormalement dispersés, etc.

La comparaison de transects successifs permet d'observer si :

- le régime était permanent (débit constant à moins de 5 % près) ;
- l'écoulement était homogène (répartition de vitesse identique sur chaque transect) ;
- l'extrapolation des mesures invalidées d'un transect était fiable par rapport à un autre transect sans ces mesures invalidées.

## 5.5 Calcul d'incertitude

### 5.5.1 Calcul détaillé

→ Se référer à la section 2.4 pour les notations et principes du calcul d'incertitude.

Dans le cas d'un jaugeage ADCP **verticale par verticale**, l'application de la méthode GUM (NF ENV 13005, 1999) de propagation des incertitudes comme pour la méthode d'exploration du champ des vitesses par courantomètres est possible [→ section 4.5]. Certains logiciels de constructeurs proposent des calculs d'incertitude, selon la norme ISO 748 ou selon des méthodes plus directes. Comme pour les courantomètres, la composante d'incertitude  $u_m$  associée au nombre limité de verticales est prépondérante.

Dans le cas d'un jaugeage ADCP **mobile, par traversées**, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode de calcul direct établie et acceptée, encore moins spécifiée par une norme.



### 5.5.2 Estimation rapide

En pratique, la répétabilité est partiellement représentative de l'incertitude, et elle doit normalement être inférieure à 5 %. Une estimation rapide de l'incertitude consiste donc à répéter la mesure au moins quatre à six fois de suite, soit  $n \geq 4$  mesures successives  $Q_i$ , pour un écoulement à débit stable et dans les mêmes conditions de mesure. Les formules suivantes peuvent alors être appliquées [→ explications section 2.4.2.2] :

- Si  $n \geq 6$ , prendre :

$$u'_Q = \frac{\text{écart-type}(Q_i)}{\text{moyenne}(Q_i)}$$

- Si  $n < 6$ , on considère une loi de distribution rectangulaire [→ GUM ISO], ce qui implique :

$$u'_Q = \frac{\max(Q_i) - \min(Q_i)}{\sqrt{3} \text{ moyenne}(Q_i)}$$

Rappel : l'incertitude élargie finale (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) dont il faut assortir la mesure de débit vaut :

$$U'_Q = 2 \times u'_Q \text{ (en \%)}$$

Toutefois, des erreurs systématiques peuvent être induites, notamment par les extrapolations de débit réalisées sur les parties non-mesurées de la section (haut, bas, bords, cellules invalidées). Il faut donc accorder une grande attention au ratio  $Q_{\text{mesuré}}/Q_{\text{total}}$  [→ section 5.1.3], d'autant plus faible que la part de débit extrapolé augmente :

- ratio  $Q_{\text{mesuré}}/Q_{\text{total}} > 70\%$  : vigilance usuelle sur les données à inspecter ;
- ratio  $Q_{\text{mesuré}}/Q_{\text{total}}$  entre 50 et 70 % : vérifier la pertinence des extrapolations de débit réalisées, calculer l'impact des extrapolations en changeant les lois et coefficients d'extrapolation, vérifier la valeur et l'influence de l'enfoncement du capteur et des distances aux bords ;
- ratio  $Q_{\text{mesuré}}/Q_{\text{total}} < 50\%$  : jaugeage indicatif à vérifier par des contrôles.

### 5.5.3 Valeurs usuelles

Le respect des bonnes pratiques de jaugeage par ADCP mobile est primordial pour ne pas augmenter les incertitudes. En particulier, des résultats dégradés apparaissent pour des déploiements mal maîtrisés (stabilité du support, trajectoire), des paramétrages de l'appareil inadaptés, des conditions de mesure défavorables (en particulier, écoulement variable ou irrégulier). Ces erreurs peuvent donc être limitées par une bonne maîtrise de l'utilisation de l'appareil et une bonne critique des résultats.

On retiendra les valeurs suivantes, usuellement rencontrées pour l'incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) :

- dans les bonnes conditions d'application, un jaugeage ADCP issu d'une moyenne de 4 à 6 traversées en régime permanent, et avec un coefficient de variation inférieur à 2,5%, est considéré incertain à 5 % ;
- en conditions défavorables (ratio  $Q_{mesuré}/Q_{total} < 50\%$ , cellules invalidées, support instable, trajectoire erratique, durée de jaugeage trop brève), l'incertitude peut monter à 10 ou 15%, ce qui est aussi le cas d'un débit issu d'une seule traversée ADCP ;
- enfin, un jaugeage ADCP réalisé dans de mauvaises conditions peut être entaché d'incertitudes de 20 à 30 %.

Dans le cas d'un contrôle, et dans les bonnes conditions d'application, on retiendra une valeur maximale de  $U'_Q = 10\%$ .

Les valeurs usuelles et limites de l'incertitude élargie  $U'_Q$  sont résumées dans le tableau comparatif en Annexe B pour chaque méthode de jaugeage.



# Exploration du champ des vitesses

## Les flotteurs

# 6

### 6.1 Principe de la méthode

Les mesures d'exploration du champ des vitesses par flotteurs sont utilisées :

- lorsqu'il est impossible d'employer un instrument de mesure intrusif sans mettre en péril la sécurité des opérateurs ou du matériel (vitesses ou profondeurs excessives, corps flottants) ;
- lorsque les vitesses et/ou profondeurs sont trop faibles ;
- lorsque l'on veut obtenir une estimation rapide du débit ;
- lorsque le matériel utilisé classiquement est en panne ou indisponible.

Cette méthode s'appuie sur une estimation de la vitesse moyenne et de la surface mouillée de l'écoulement, à l'aide de flotteurs se déplaçant en surface de l'écoulement.

La vitesse  $v_s$  [m/s] d'un flotteur est déterminée simplement en chronométrant le déplacement du flotteur entre deux sections de mesure :

$$v_s = \frac{L}{T}$$

où  $T$  [s] est le temps mis par le flotteur pour parcourir la distance  $L$  [m] entre les deux sections considérées.

La vitesse moyenne de l'écoulement sur la verticale peut alors être estimée en multipliant la vitesse de déplacement du flotteur par un coefficient appelé coefficient de vitesse. Plusieurs trajectoires de flotteurs permettent d'explorer les vitesses sur différentes verticales. La géométrie des sections amont et aval (ou au moins l'une des deux) est mesurée sur un nombre suffisant de verticales.

Il est donc possible de calculer le débit par intégration des vitesses, comme pour les autres méthodes d'exploration des vitesses. Les débits partiels sont calculés sur les différentes sous-sections correspondant à chaque trajectoire de flotteurs. Le débit total est la somme de ces débits partiels.

Toutefois, dans le cadre d'un contrôle de débit, une méthode simplifiée est préconisée, conformément au rapport technique ISO/TR 9823 (1990). Cette méthode est robuste si l'écoulement et le tronçon explorés sont suffisamment réguliers. La vitesse de surface sera mesurée trois fois sur chacune de trois trajectoires correspondant à des injections successives de flotteurs situées à 1/4, 1/2, et 3/4 de la largeur [→ ISO/TR 9823, 1990]. Les trajectoires de bords pourront être rapprochées de la trajectoire centrale si l'écoulement n'est pas régulier ou si les flotteurs risquent d'être piégés dans des zones d'eau morte ou de la végétation par exemple. En prenant la moyenne des trois mesures valides sur chaque trajectoire, et après multiplication par le coefficient de surface, on obtient trois mesures de vitesse moyenne,

qui permettent une évaluation de la valeur moyenne  $c_{moy}$  du coefficient  $c = v_{moy} / \sqrt{h}$  (proportionnel au coefficient de Chézy, → ISO/TR 9823, 1990).

La section mouillée moyenne de l'écoulement sera établie soit à partir d'une des deux sections (cas d'un tronçon régulier), soit comme la moyenne des deux sections mouillées amont et aval. Ces sections seront mesurées rapidement avec un nombre suffisant de verticales pour réduire l'erreur introduite sur la section mouillée moyenne  $S$ . La vitesse moyenne est alors calculée à partir de la profondeur moyenne  $S/B$  avec  $B$  la largeur au miroir, et du coefficient  $c_{moy}$ . Cette vitesse moyenne pourra être corrigée par un coefficient corrigeant la décroissance des vitesses aux bords, surtout si la mesure a été réalisée au centre d'une section étroite. Le débit sera enfin évalué comme le produit de cette vitesse moyenne par la section mouillée moyenne.

## 6.2 Matériel

Les flotteurs sont des objets semi-immergés entraînés à la même vitesse que l'écoulement qui les environne. Leur partie émergée doit être la plus réduite possible pour limiter la prise au vent. Elle doit également être facilement repérable depuis la berge.

Lors des mesures effectuées dans le cadre des contrôles de débit réglementaire, l'usage de flotteurs simples, ou flotteurs de surface, est recommandé. Il existe également des flotteurs composés d'éléments flottants et lestés reliés entre eux, de manière à explorer les vitesses à différents niveaux de l'écoulement, ou encore des bâtons lestés. Ce guide traite uniquement des flotteurs de surface, pouvant être employés sans qu'il soit nécessaire de connaître au préalable la profondeur de l'eau, et sans que celle-ci soit constante le long du bief de mesure. Pour l'utilisation des flotteurs autres que les flotteurs de surface, se référer à la norme NF EN ISO 748 (2002), qui indique les coefficients de vitesse correspondants.

On peut utiliser des flotteurs naturels (débris végétaux, morceaux de bois, fruits, légumes, etc.) ou artificiels (bouchons de pêche, bouchons de liège, bulles d'eau, bouteilles, balles en caoutchouc, etc.). Si les flotteurs choisis ne sont pas biodégradables, on s'efforcera de les récupérer après la mesure. Les agrumes (clémentines par exemple, → fig.6.1c) constituent d'excellents flotteurs peu onéreux, biodégradables, voyants et suffisamment lourds pour limiter la prise au vent.



Fig. 6.1 - Mode opératoire du jaugeage par flotteurs (a, ci-contre). Exemple d'application avec clémentines sur le Durzon (b et c, ci-dessus).

## 6.3 Mode opératoire

### 6.3.1 Choix de l'emplacement de mesure

Deux sections transversales parallèles (sections amont et aval) sont définies le long du bief choisi [→ fig.6.1a, sections AB et CD], et matérialisées par des repères en berge (arbres, rochers, jalons, piquets, balises, etc.).

Une section médiane peut être utilisée pour vérifier que la vitesse des flotteurs est bien constante entre les deux sections de mesure amont et aval [→ fig.6.1a, section MN].

La distance longitudinale entre les sections est mesurée (décamètre), si possible de chaque côté du cours d'eau (dans ce cas, on vérifiera le bon accord des mesures, et on considérera la moyenne rive droite / rive gauche).

#### **Recommandations générales :**

- les zones de courant oblique doivent être évitées ;
- le tronçon choisi doit être rectiligne avec des rives parallèles ;
- la visibilité doit être bonne dans tous les sens, l'emplacement bien dégagé ;
- l'accès doit être facile au moins sur une des rives ;
- la pente du lit doit être constante (pas de chute ou de zone de rapides).

### 6.3.2 Introduction des flotteurs

Le flotteur sera introduit suffisamment loin en amont de la première section pour qu'il ait atteint une vitesse constante avant de franchir celle-ci. Les instants correspondant au passage du flotteur au droit de chacune des deux sections devront être relevés à l'aide d'un chronomètre [→ fig. 6.1b]. Les sections doivent être suffisamment éloignées pour que le temps mis par les flotteurs pour aller d'une section à la suivante puisse être mesuré avec précision (la course des flotteurs doit durer environ 20 s).

On choisira au moins une position d'injection de flotteurs au centre de l'écoulement le plus rapide. Si la section est suffisamment large (> 5 m typiquement), on choisira deux positions d'injection supplémentaires à droite et à gauche de la première pour explorer la répartition des vitesses sur la largeur du cours d'eau [→ fig. 6.1b]. Typiquement, les positions d'injection seront situées à 1/4, 1/2, et 3/4 de la largeur du cours d'eau [→ ISO/TR 9823, 1990]. Veiller toutefois à ce que les flotteurs ne soient ni captés par la veine rapide, ni piégés par la végétation ou les zones d'eau morte, donc ne pas chercher à injecter trop près des bords.

Pour chaque position d'injection, il est recommandé de recommencer plusieurs fois la mesure pour un même trajet, de manière à obtenir au moins trois mesures valides par trajectoire. Éliminer les mesures correspondant à des trajectoires singulières ou durées aberrantes, et recommencer l'injection.

### 6.3.3 Mesure de la position des flotteurs

On relèvera la position de chaque flotteur lorsqu'il franchit la section amont et la section aval. Ces positions doivent être repérées à partir d'un même point de référence situé dans l'axe de la section transversale de mesure. Ne pas oublier de spécifier sur la fiche de terrain si ce repère origine est situé en rive droite ou en rive gauche du cours d'eau.



Ces distances horizontales peuvent être mesurées à l'aide de différents matériels : mètre ruban, décamètre, appareil topographique (télémètre, niveau et mire), etc.

Lorsqu'il n'est pas possible de mesurer ces distances directement, un procédé par triangulation permettant d'obtenir la position du flotteur en effectuant des relevés depuis l'une des berges peut être mis en oeuvre [→ Aldegheri, 1979]. Ce protocole est toutefois trop lourd pour un contrôle de débit, et est plutôt à réserver aux mesures de crue.

### 6.3.4 Mesure de la vitesse des flotteurs

On relèvera le temps de parcours de chaque flotteur entre la section amont et la section aval. Par exemple, l'opérateur injectant les flotteurs indiquera le moment où le flotteur franchit la section amont à l'opérateur chargé de déclencher le chronomètre. Ce deuxième opérateur pourra être situé à l'aval, de manière à arrêter le chronomètre lors du franchissement de la section aval par le flotteur.

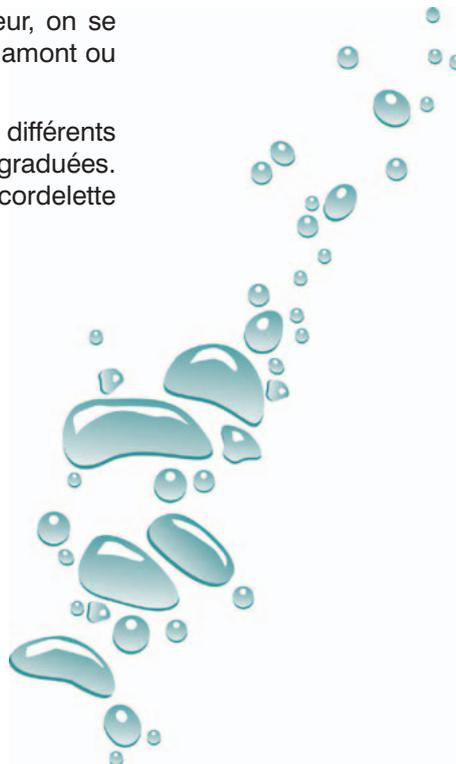
La vitesse de chaque flotteur est calculée comme la distance entre sections divisée par le temps de parcours du flotteur. La vitesse  $v_s$  pour chaque position d'injection sera alors égale à la moyenne des résultats de vitesses obtenus (ne pas moyenner les temps, mais les vitesses). Rappel : on s'efforcera de disposer d'au moins trois mesures valides pour établir cette moyenne.

### 6.3.5 Mesure des profondeurs

La profondeur du cours d'eau doit être mesurée au droit des deux sections transversales amont et aval, pas seulement à l'aplomb de chaque trajectoire de flotteur, mais en un nombre de verticales suffisant pour décrire correctement la géométrie du lit. Pour une section naturelle, on effectuera au moins douze à quinze mesures de profondeur en travers du cours d'eau. Un nombre plus réduit de verticales peut permettre de décrire la géométrie de sections plus simples (par exemple, canal maçonné).

Dans le cas d'un tronçon de géométrie prismatique, et dans le cas où une des deux sections n'est pas accessible à la mesure de profondeur, on se contentera de mesurer les profondeurs sur une des deux sections amont ou aval seulement.

Les mesures de profondeur peuvent être réalisées à l'aide de différents matériels. On emploiera de préférence des perches de sondage graduées. D'autres types d'appareillages peuvent être utilisés (par exemple, cordelette lestée, sondeur acoustique).



## 6.4 Dépouillement des mesures

### 6.4.1 Détermination de la vitesse moyenne sur chaque trajectoire

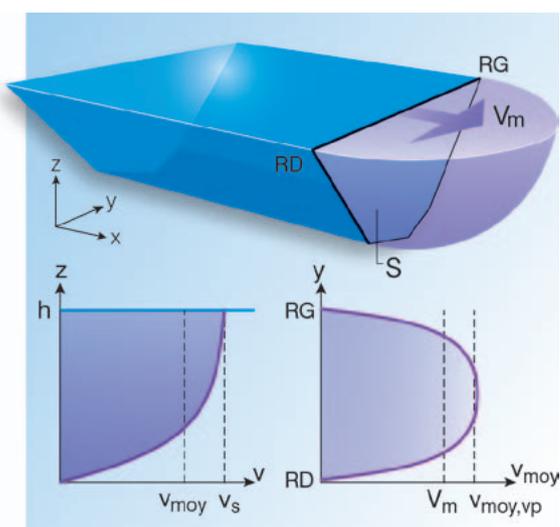


Fig. 6.2 - Description schématique des coefficient de surface  $\alpha_s$  et coefficient de bord  $\alpha_b$ .

La vitesse du flotteur  $v_s$  permet d'obtenir une approximation de la vitesse moyenne  $v_{moy}$  de l'écoulement à la verticale de la trajectoire du flotteur. Cette vitesse moyenne  $v_{moy}$  est calculée par :

$$v_{moy} = \alpha_s \times v_s$$

avec  $\alpha_s$  un coefficient de vitesse, dont la valeur dépend du type de flotteur utilisé, et de la structure de l'écoulement [→ fig. 6.2]. Dans le cas des flotteurs de surface (les plus courants), ce coefficient de vitesse est appelé coefficient de vitesse de surface.

Pour un écoulement régulier et un flotteur de surface simple, les valeurs typiques de  $\alpha_s$  varient de 0,80 (fond rugueux) à 0,90 (fond lisse), avec une valeur moyenne proche de 0,85. L'intervalle peut être bien plus étendu pour des écoulements perturbés.

Dans le cas où plusieurs mesures de vitesses sont répétées sur la même trajectoire (typiquement trois), on considèrera la moyenne des vitesses mesurées, en s'assurant que les écarts entre mesures sont raisonnables (< 20 % typiquement).

### 6.4.2 Calcul du débit : méthode par sous-sections

À partir des données recueillies (vitesses moyennes, distances à la rive des verticales et profondeur selon chacune de ces verticales), on utilise les mêmes méthodes d'intégration que pour le moulinet. Ici nous employons la méthode de la section médiane [→ fig. 6.3]).

La vitesse moyenne  $v_{moy}$  pour chaque verticale, calculée précédemment, est considérée comme représentative de la vitesse de l'écoulement sur l'élément de section mouillée correspondant.

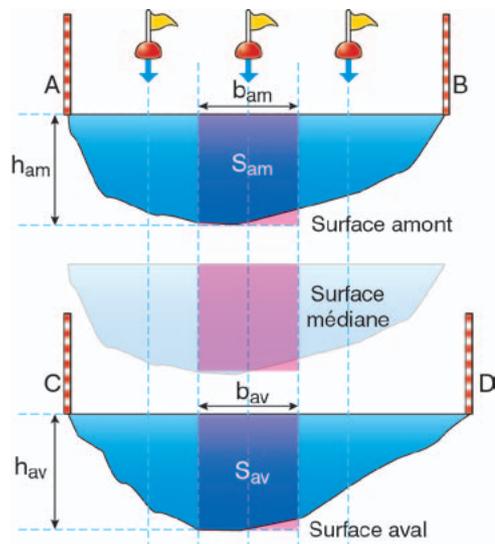


Fig. 6.3 - Méthode d'intégration du débit mesuré à l'aide de flotteurs.

La section transversale du cours d'eau est ainsi décomposée en un certain nombre d'éléments juxtaposés. La largeur  $b_i$  de chaque élément de section  $i$  est égale à la somme des deux demi-distances entre la verticale le représentant et chacune des deux verticales situées de part et d'autre.

La surface  $S_i$  d'un élément de section correspondant à un trajet sera la moyenne des surfaces des éléments de section amont et aval :

$$S_i = \frac{S_{i,am} + S_{i,av}}{2} = \frac{h_{i,am} b_{i,am} + h_{i,av} b_{i,av}}{2}$$

Le débit  $q_i$  dans chaque élément de section est obtenu par :

$$q_i = v_{moy,i} \times S_i$$

Le débit total  $Q$  est obtenu en faisant la somme des débits partiels calculés pour chaque élément de section :

$$Q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

### 6.4.3 Calcul du débit : méthode simplifiée

Dans le cadre d'un contrôle de débit, une estimation du débit par la méthode des flotteurs doit rester simple et rapide. Sinon, une technique de mesure plus exacte mérite d'être mise en œuvre. La méthode simplifiée proposée dans cette section s'inspire de la méthode de mesure avec un nombre réduit de verticales décrite dans le rapport technique ISO/TR 9823 (1990).

À partir des vitesses moyennes de surface sur chaque trajectoire (typiquement trois valeurs  $v_{s,1}$ ,  $v_{s,2}$ ,  $v_{s,3}$ ) et des profondeurs correspondantes ( $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ), on calcule les coefficients  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  comme suit :

$$c_i = v_{moy,i} / \sqrt{h_i} = \alpha_s \times v_{s,i} / \sqrt{h_i}$$

avec  $\alpha_s$  le coefficient de vitesse de surface.

L'écart maximal entre ces trois valeurs de  $c$  (typiquement inférieur à 10 %) donne une estimation de l'erreur minimale introduite par la méthode. La moyenne des trois valeurs  $c_i$  est notée  $c_{moy}$ .

La vitesse moyenne  $V$  est alors calculée à partir de la profondeur moyenne  $S/B$ , avec  $S$  la section mouillée moyenne et  $B$  la largeur au miroir :

$$V_m = c_{moy} \sqrt{S/B}$$

Le débit est enfin simplement obtenu comme le produit de cette vitesse moyenne par la section mouillée moyenne :

$$Q = V_m \times S = c_{moy} \sqrt{S/B} S$$

Dans de nombreuses situations où l'écoulement et la géométrie du tronçon sont réguliers, cette méthode simplifiée de calcul du débit n'introduit pas d'erreur significative sur le résultat final, par rapport à la méthode par sous-sections.

### 6.4.4 Coefficient de vitesse de bord

Il est très souvent difficile de suivre des trajectoires de flotteur aux bords de l'écoulement. En pratique, surtout pour une section peu large, un flotteur suit généralement la trajectoire de la veine principale où les vitesses sont sensiblement les mêmes. Si le flotteur est injecté trop près du bord au niveau de la section amont, il risque d'être capturé par un écoulement secondaire (dû à un bloc immergé, à la végétation rivulaire, ou simplement du fait des faibles profondeurs) ; le temps de parcours du flotteur peut alors être très largement surestimé, et la vitesse sous-estimée.

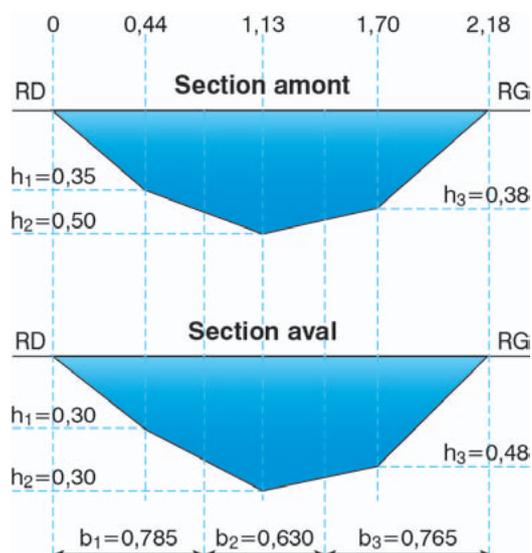
Dans le cas d'une section étroite (canal maçonné par exemple) où seules les vitesses de la veine rapide ont pu être mesurées convenablement, la vitesse moyenne calculée sera surestimée. Dans le cadre d'un contrôle, cette surestimation n'est pas gênante si un débit largement inférieur au débit réglementaire est constaté.

Toutefois, une correction peut être apportée pour tenir compte de la distribution des vitesses en travers de la section (→ fig. 6.2). La vitesse moyenne sur la section de mesure  $V_m$  peut alors être corrigée par un coefficient de vitesse de bord  $\alpha_b$  qui relie la vitesse moyenne mesurée dans la veine principale de l'écoulement à la vitesse moyenne sur la section entière. Ce coefficient de vitesse supplémentaire est principalement fonction du rapport entre la profondeur d'eau moyenne et la largeur de la section, ainsi que de la forme de la section et de la rugosité des bords. Il peut généralement être pris égal à 0,90 pour minimiser le risque d'introduire une surestimation de débit.



## 6.4.5 Exemple

Cet exemple est présenté à partir du modèle de fiche « Exploration du champ des vitesses à l'aide de flotteurs » proposé en annexe.



### → Exemple de jaugeage par flotteur

Distance entre les sections amont et aval :  $L = 18 \text{ m}$

Temps de parcours  $T_i$  mesuré pour chacun des flotteurs

Vitesse de parcours de chacun des flotteurs calculé selon :  $v_{s,i} = L / T_i$

	vert. 1	vert. 2	vert. 3
$T_i$ [s]	30	23	28
$v_{s,i}$ [m/s]	0,60	0,78	0,64

• Calcul de la vitesse moyenne sur chaque verticale :

$v_{moy} = \alpha_s v_s$  avec  $\alpha_s = 0,85$  (flotteurs de surface et fond de rivière caillouteux)

verticale 1 :  $v_{moy,1} = 0,85 \times 0,60 = 0,51 \text{ m/s}$

verticale 2 :  $v_{moy,2} = 0,85 \times 0,78 = 0,66 \text{ m/s}$

verticale 3 :  $v_{moy,3} = 0,85 \times 0,64 = 0,55 \text{ m/s}$

• Calcul de la surface des éléments de section correspondants :

$S_i = (h_{i,amont} + h_{i,aval}) \times b_i / 2$

verticale 1 :  $b_1 = 0,44 + (1,13 - 0,44) / 2 = 0,79 \text{ m}$

$S_1 = (0,35 + 0,30) \times 0,79 / 2 = 0,26 \text{ m}^2$

verticale 2 :  $b_2 = (1,13 - 0,44) / 2 + (1,70 - 1,13) / 2 = 0,63 \text{ m}$

$S_2 = (0,50 + 0,60) \times 0,63 / 2 = 0,35 \text{ m}^2$

verticale 3 :  $b_3 = (1,70 - 1,13) / 2 + (2,18 - 1,70) / 2 = 0,77 \text{ m}$

$S_3 = (0,38 + 0,48) \times 0,77 / 2 = 0,33 \text{ m}^2$

• Calcul du débit pour chaque élément de section :  $q_i = v_{moy} \times S_i$

verticale 1 :  $q_1 = 0,51 \times 0,255 = 0,13 \text{ m}^3/\text{s}$

verticale 2 :  $q_2 = 0,66 \times 0,347 = 0,23 \text{ m}^3/\text{s}$

verticale 3 :  $q_3 = 0,55 \times 0,329 = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$

• Calcul du débit total :  $Q = q_1 + q_2 + q_3$

$Q = 0,13 + 0,23 + 0,18 = 0,54 \text{ m}^3/\text{s} = 540 \text{ L/s}$

• Résultat final présenté avec 2 chiffres significatifs (arrondi par excès) :

$$Q = 540 \text{ L/s}$$

### Calcul du débit total par la méthode simplifiée

• Calcul de la vitesse moyenne  $v_{moy,i}$  sur chaque verticale :

Voir exemple de calcul par sous-section ci-dessus.

• Calcul des profondeurs moyennes sur chaque trajectoire :

$h_i = (h_{i,amont} + h_{i,aval}) / 2$

verticale 1 :  $h_1 = (0,35 + 0,30) / 2 = 0,33 \text{ m}$

verticale 2 :  $h_2 = (0,50 + 0,60) / 2 = 0,55 \text{ m}$

verticale 3 :  $h_3 = (0,38 + 0,48) / 2 = 0,43 \text{ m}$

• Calcul des coefficients  $c_i$  sur chaque trajectoire :

$c_i = v_{moy,i} / \sqrt{h_i}$

verticale 1 :  $c_1 = 0,51 / \sqrt{0,33} = 0,895$

verticale 2 :  $c_2 = 0,66 / \sqrt{0,55} = 0,890$

verticale 3 :  $c_3 = 0,55 / \sqrt{0,43} = 0,839$

- Calcul de la valeur moyenne  $c_{moy}$  :

$$c_{moy} = (c_1 + c_2 + c_3) / 3 = 0,874$$

L'écart maximal relatif vaut  $(0,895 - 0,839) / c_{moy} = 6 \%$ , ce qui est acceptable.

- Calcul du débit total :

$$Q = c_{moy} \sqrt{S/B} S$$

La surface moyenne vaut  $S = 0,94 \text{ m}^2$  (même calcul que pour la méthode par sous-sections). La largeur au miroir moyenne vaut  $B = 2,18 \text{ m}$ .

On obtient ainsi  $Q = 0,540 \text{ m}^3/\text{s} = \mathbf{540 \text{ L/s}}$  (résultat final présenté avec 2 chiffres significatifs).

On obtient aux arrondis près le même résultat qu'avec la méthode plus complète de calcul par sous-sections.

Si l'on tient compte d'une potentielle surestimation due à des vitesses plus faibles aux bords qui n'auraient pas été mesurées, on peut apporter une correction avec  $\alpha_b = 0,90$ , soit  $Q = 0,90 \times 540 = 490 \text{ L/s}$ .



## 6.5 Évaluation des incertitudes

### 6.5.1 Formalisation des incertitudes

→ Se référer à la section 2.4 pour les notations et principes du calcul d'incertitude.

La norme NF EN ISO 748 (2002) propose une méthode de calcul d'incertitude sur le jaugeage aux flotteurs proche de celle pour le jaugeage au courantomètre [→ section 4.5], mais qui n'est pas praticable pour un nombre de verticales inférieur à cinq.

Dans le cas d'un contrôle de débit minimal, le débit est estimé grossièrement grâce à la mesure de flotteurs sur 1 à 3 verticales maximum, ce qui ne permet pas d'appliquer cette méthode de calcul. On présente ici une formalisation des incertitudes permettant simplement d'appréhender le poids des différentes sources d'incertitudes dans un débit mesuré par la méthode des flotteurs sur un nombre réduit de verticales.

Si l'on considère la formule générale suivante pour le jaugeage au flotteur simplifié :

$$Q = \alpha_s v_s \frac{S_{am} + S_{av}}{2} = \alpha_s v_s S$$

l'application de la méthode GUM [→ NF ENV 13005, 1999] de propagation des incertitudes donne alors :

$$u'_Q{}^2 = u'_{\alpha_s}{}^2 + u'_{v_s}{}^2 + u'_S{}^2$$

À partir des valeurs usuellement constatées en rivière, on peut estimer qu'en général  $u'_{\alpha_s} = 10 \%$ .

$u'_S$  combine également deux sources d'incertitudes : l'incertitude due à la mesure des sections amont  $S_{am}$  et aval  $S_{av}$ , et l'incertitude due à l'estimation de la section moyenne du bief par  $(S_{am} + S_{av}) / 2$ . Sur un chenal régulier, la deuxième incertitude peut être négligée devant la première. La première incertitude est surtout liée au nombre de verticales sur lesquelles la profondeur a été mesurée pour calculer chaque section. En considérant les valeurs données dans l'Annexe E de la norme NF EN ISO 748 (2002), on considérera

par précaution  $u'_s = 15\%$  pour 5 verticales, et  $u'_s = 25\%$  pour 1 à 3 verticales. Ceci n'est qu'une évaluation qui peut être affinée en fonction des cas. Il est notamment conseillé de réduire cette incertitude en décrivant les sections amont et aval par un plus grand nombre de verticales (dans ce cas, reprendre les valeurs de  $u'_m$  données dans la norme NF EN ISO 748 (2002)).

$u'_{v_s}$  combine deux sources d'incertitudes : l'incertitude due à la mesure de la vitesse des flotteurs par chronométrage, et l'incertitude due à l'estimation de la vitesse moyenne dans la section par un nombre limité de flotteurs. Pour un nombre réduit de verticales (1 à 3 typiquement), la première incertitude est négligeable devant la seconde. Elle reste difficile à évaluer car elle dépend de la distribution des vitesses en travers de la section et de la distribution des flotteurs dans la section. Typiquement,  $u'_{v_s}$  vaut au moins 10 % à 25 %.

### 6.5.2 Valeurs usuelles

La méthode de jaugeage par flotteurs ne fournit qu'un jaugeage indicatif permettant simplement de détecter une infraction grossière ou de justifier le déclenchement d'un jaugeage de contrôle par une méthode adaptée et plus précise. Pour la plupart des cas, l'incertitude élargie  $U'_Q$  (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) peut difficilement être annoncée inférieure à 30 %, voire 50 %. Toutefois, dans les meilleures conditions d'application (écoulement régulier et parallèle, section et tronçon réguliers et uniformes, vitesses répétées sur au moins trois trajectoires), l'incertitude élargie  $U'_Q$  (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) peut atteindre les 10 %. Lorsque l'on applique la méthode simplifiée, l'écart entre les valeurs maximales du coefficient  $c$  rapporté à la valeur moyenne  $c_{moy}$  peut être considéré par sécurité comme une valeur minimale de  $U'_Q$ .

Dans le cas d'un contrôle, on retiendra une valeur maximale de  $U'_Q = 50\%$  (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ), et de 30 % dans les meilleures conditions d'application.

Les valeurs usuelles et limites de l'incertitude élargie  $U'_Q$  sont résumées dans le tableau comparatif *Annexe B* pour chaque méthode de jaugeage.



# Méthode par dilution

## 7

### 7.1 Principe de la méthode

#### 7.1.1 Généralités

La méthode de jaugeage par dilution <sup>1</sup> consiste à injecter en un point du cours d'eau un traceur en solution, et à suivre l'évolution de sa concentration au niveau d'une section située à l'aval.

L'injection s'effectue sous forme d'une solution de concentration connue, soit de façon quasi instantanée, soit de façon continue à débit constant. Le suivi de la concentration au point de mesure aval peut se faire soit par une série de prélèvements d'échantillons à doser ultérieurement au laboratoire, soit à l'aide d'un capteur enregistrant un paramètre physique (conductivité électrique, fluorescence) variant linéairement avec la concentration du traceur utilisé.

Seule la méthode par **injection instantanée** <sup>2</sup> et **avec capteur enregistreur** est décrite, car ses caractéristiques correspondent mieux à l'objectif de ce guide :

- mise en œuvre moins complexe (notamment, il n'y a pas besoin d'équipement particulier pour l'injection) ;
- faible quantité de traceur injectée, donc moins de risques pour la qualité de l'eau et coût réduit ;
- pas de prélèvements en continu, d'analyse cinétique des échantillons, ni d'analyse spécifiques en laboratoire.

Même avec ce protocole simplifié, cette méthode exige une certaine technicité pour une mise en œuvre efficace. Toutefois, lorsque les conditions de mesure sont optimales, la méthode par dilution présente des incertitudes des plus réduites (de l'ordre de 3 %). En particulier, la distance entre le point d'injection et la section aval choisie doit être suffisante pour que le mélange du traceur avec l'eau puisse être complètement réalisé. La longueur minimale du tronçon de rivière nécessaire pour assurer ce mélange est appelée communément **longueur de bon mélange**.

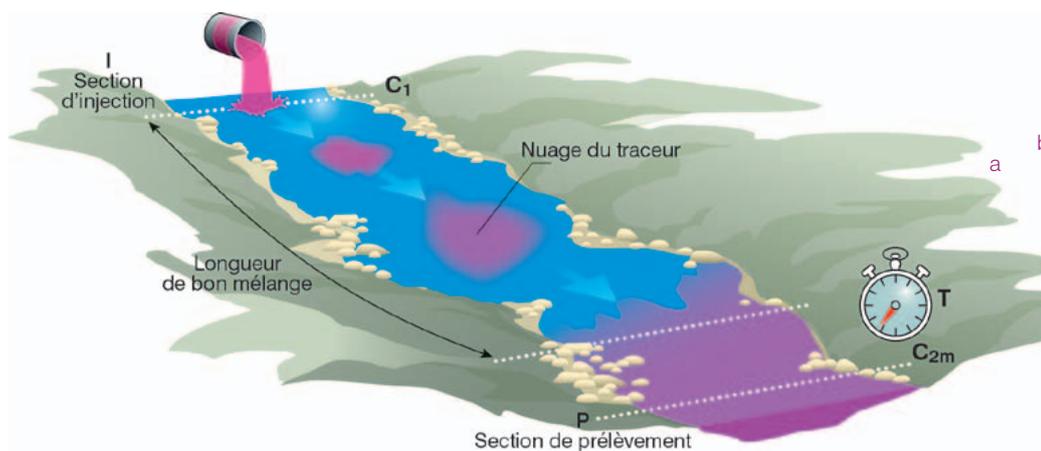
La méthode par dilution est particulièrement adaptée aux torrents de montagne sur lesquels le brassage est important, et pour lesquels les méthodes par exploration du champ de vitesses sont souvent inadaptées. Cette technique est complémentaire de la méthode par exploration du champ des vitesses. Elle peut aussi être employée sur des cours d'eau plus calmes, à condition de prendre une longueur de bon mélange plus grande.

*1 - Également appelée méthode chimique ou jaugeage chimique.*

*2 - Appelée aussi méthode globale ou méthode par intégration.*

### 7.1.2 Principe du procédé par injection instantanée

En un point I du cours d'eau, on injecte brièvement un volume  $Vol_1$  de solution de traceur à la concentration connue  $C_1$ , soit une masse  $M$  de traceur [→ fig. 7.1]. En un deuxième point P choisi à l'aval (de façon qu'un bon mélange soit assuré et que le débit soit le même qu'au point d'injection I), on enregistre la concentration  $C_2$  dans le cours d'eau pendant une durée englobant la durée  $T$  du passage du traceur. Il est ainsi possible de déterminer la concentration moyenne  $C_{2m}$  sur la durée  $T$ .



Si  $Vol$  est le volume d'eau écoulé dans la rivière pendant la durée  $T$ , la masse de traceur au point P est égale au produit de ce volume  $Vol$  par la concentration moyenne  $C_{2m}$  du traceur sur toute la durée de son passage. Si le traceur est conservatif, la masse injectée en amont doit se retrouver intégralement en aval :

$$Vol_1 \times C_1 = Vol \times C_{2m}$$

On peut ainsi calculer le débit  $Q = Vol / T$  par :

$$Q = \frac{Vol_1}{T} \times \frac{C_1}{C_{2m}} = \frac{M}{TC_{2m}}$$

Le rapport  $C_1 / C_{2m}$  est appelé facteur de dilution et est noté  $D$ .

### 7.1.3 Choix du traceur

Dans la pratique, les traceurs utilisés sont des corps chimiques qui doivent satisfaire au mieux les conditions suivantes :

- bonne stabilité chimique ;
- grande solubilité dans l'eau ;
- absence d'absorption ou d'adsorption (par les sédiments, les matières en suspension, la végétation, etc.) ;
- absence de toxicité aux concentrations pratiquées ;
- possibilité de dosage à faible concentration ;
- présence en faibles quantités dans les eaux où s'effectue la mesure ;
- coût peu élevé (compte tenu de la quantité nécessaire).

Les traceurs les plus utilisés sont **les traceurs ioniques** (sels minéraux) et **les traceurs fluorescents** (rhodamine WT, fluorescéine). Les traceurs utilisés et leurs concentrations doivent être compatibles avec la législation concernant le déversement occasionnel et de courte durée de substances étrangères dans les eaux naturelles.



Romain Chazal, Onema



Romain Chazal, Onema



Romain Chazal, Onema

Fig. 7.1a - Principe du procédé par injection instantanée.

Fig. 7.1b,c,d - Exemple d'injection instantanée et mélange de rhodamine WT sur le Cernon.

Dans le cas de la conductimétrie, la conductivité naturelle de l'eau de la rivière n'est généralement pas négligeable, ce qui conduit à injecter une quantité suffisante de sel pour que les variations de conductivité soient décelables et significatives. L'utilisation de ce procédé est donc réservée à la mesure des petits débits afin que la quantité injectée ne soit pas trop importante. Attention, en hiver la conductivité des torrents de montagne peut être influencée par le salage des routes lors de périodes de pluie et/ou de fonte des neiges.

→ **Important** : lors de l'achat de traceurs pour mesurer les débits par dilution, il est indispensable de demander au fournisseur la fiche de sécurité du produit. Cette fiche de sécurité permettra aux agents de prendre conscience du niveau de dangerosité du produit pour eux-mêmes ou pour le milieu. Les phrases de risques « phrases R » citées sur la fiche de sécurité permettront un choix adapté des EPI (équipements de protection individuels), les mélanges à éviter et un certain nombre d'instructions.

### 7.1.4 Capteurs-enregistreurs

#### ■ Conductimètres

Les conductimètres [→ fig. 7.2] sont utilisés pour suivre la conductivité électrique du liquide, qui est proportionnelle à la concentration en sels minéraux, pour les faibles concentrations.

Cet effet est particulièrement sensible pour le chlorure de sodium (NaCl) qui peut être utilisé comme traceur. On trouve sur le marché des conductimètres dédiés au jaugeage par dilution, qui calculent directement le débit à partir de l'enregistrement, mais ne permettent pas toujours un accès à la série temporelle de conductivité pour vérifications ultérieures.

#### ■ Fluorimètres

Depuis peu, des fluorimètres [→ fig. 7.3] permettent l'enregistrement *in situ* de la concentration en rhodamine WT ou d'autres traceurs conservatifs fluorescents.

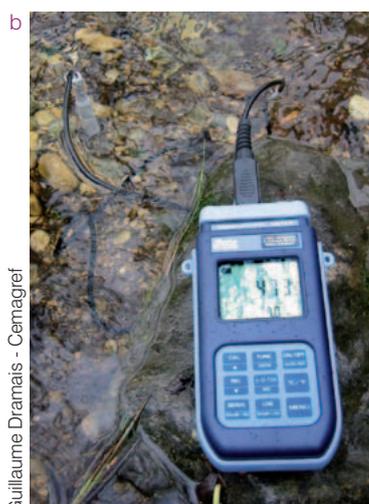


Fig. 7.2 - Exemples de conductimètres utilisés pour le jaugeage par dilution : (a) Salinomadd - MADD, (b) conductimètre-thermomètre HD2106.2 - deltaOHM.



Fig 7.3 - Exemple de fluorimètre portatif (et sa console) utilisé pour le jaugeage par dilution (GGUN-FL30 - Albillia).

## 7.2 Mode opératoire

### 7.2.1 Matériel nécessaire

- Burette en plastique graduée (1 ou 2 L) ;
- seau (gradué) ;
- ustensile pour mélanger ;
- nécessaire pour fixer le capteur dans l'eau ;
- échelle limnimétrique mobile.

Pour la préparation du traceur :

- balance électronique (résolution 0,5 g pour le sel, 1 mg pour la rhodamine WT si utilisation pour les dosages) ;
- si les dosages de traceur liquides ne sont pas fait à la balance : pipettes, pro-pipettes, fioles jaugées, pissette pour rincer, etc. ;
- sachets ou flacons pour le stockage des doses ;
- équipements de protection individuelle (gants, blouse, etc.).

→ **Remarque générale** : consigner dans un cahier de laboratoire les étalonnages et contrôles des instruments de mesure (conductimètres, fluorimètres, balances, etc.). Penser à étiqueter systématiquement les flacons intermédiaires de solution et les doses de traceur à utiliser avec comme indications, le volume, la concentration et la date de préparation.

### 7.2.2 Recommandations

Le bief de mesure choisi doit permettre d'obtenir **un bon mélange** et ne doit pas présenter de risque de rétention du traceur. Il faut donc éviter en particulier les zones d'eaux mortes, les zones encombrées de végétation et choisir une portion de rivière où le brassage, notamment latéral, est important (blocs rocheux, méandres, vitesses rapides, etc.). Il est recommandé de noter (en commentaire sur la fiche terrain par exemple) la localisation exacte des points d'injection et de mesure, ainsi qu'une description de la section d'écoulement en ces points et sur l'ensemble du parcours (largeur, profondeur, type d'écoulement). Si possible, ces indications seront complétées par des photos.

Il faut éviter tout risque de pollution par des apports en traceur extérieurs à la mesure, ou au contraire de réduction du traceur, par adsorption sur les matières en suspension par exemple pour la rhodamine WT<sup>3</sup>.

L'injection du traceur doit s'effectuer si possible au milieu de la largeur du cours d'eau et dans une zone de fortes vitesses. L'injection peut s'effectuer également à partir d'une berge à condition de rechercher une zone où le courant est orienté vers la berge opposée, par exemple à l'intérieur des virages et légèrement en amont de la courbure.

Des précautions concernant la propreté des flacons (de prélèvement et de préparation) et la parfaite homogénéité des solutions sont impératives.

La méthode de jaugeage par dilution requiert des conditions de mesure particulières, assurant notamment la conservation et le bon mélange du traceur utilisé. Pour vérifier que ces conditions sont respectées, il est recommandé de réaliser au moins une fois sur chaque site des mesures comparatives entre la méthode par dilution et une autre méthode de référence. Après cette



3. Des protocoles d'analyse cinétique des échantillons existent, mais ils sont trop complexes pour être traités dans ce guide (se reporter au protocole EDF-DTG).

évaluation, on reportera avec précision sur une fiche terrain les lieux d'injection et de mesure les plus adaptés afin d'éviter toute confusion pour les opérateurs suivants. Une fois déterminée la procédure adaptée à chaque site, il est conseillé de réaliser en routine deux injections successives, les débits établis par la méthode de dilution ne devant différer que de 1 à 2 % dans la majorité des cas.

### 7.2.3 Opérations préalables

Plusieurs paramètres doivent être évalués avant le début effectif de la mesure. On doit en particulier déterminer la distance minimale entre les sections d'injection et de prélèvement, la durée d'enregistrement et la masse de traceur à injecter.

#### 7.2.3.1 Estimation de la longueur de bon mélange

La longueur de bon mélange  $L_{bm}$  est la longueur minimale du tronçon de rivière à partir de la section d'injection à l'amont telle que la concentration en traceur soit homogène au niveau de la section de prélèvement. La longueur nécessaire peut être très variable. Elle dépend des caractéristiques du tronçon de cours d'eau, et peut être dans certains cas importante (50 m à plusieurs kilomètres). La méthode par dilution ne peut donc pas être mise en œuvre lorsque la distance entre la prise d'eau amont et la restitution aval est insuffisante pour assurer le bon mélange. Les bras multiples et les zones d'eau morte ou de recirculation sont défavorables au bon mélange.

Pour estimer la longueur de bon mélange, il est possible de réaliser un essai de coloration : un colorant (fluorescéine ou rhodamine par exemple) est injecté au niveau de la section amont du cours d'eau présumée et le déplacement du nuage coloré est suivi jusqu'au point où l'eau apparaît uniformément colorée sur toute la largeur. On choisira, par prudence, une section de prélèvement encore un peu plus à l'aval de ce point. On consignera les résultats de ce test afin de constituer un historique de la section de jaugeage.

Plusieurs formules empiriques ou semi-empiriques ont été proposées pour estimer la longueur de bon mélange  $L_{bm}$ , selon les conditions d'écoulement et le type de cours d'eau. Elles doivent être maniées avec précaution. Seules quelques formules d'application courante sont indiquées ci-après.

**Pour un cours d'eau**, on pourra appliquer la formule de Rimmar [André, 1976 ; Boiten, 2000] :

$$L_{bm} = 0,13 K \frac{B^2}{h}$$

avec  $B$  [m] et  $h$  [m] la largeur et la profondeur moyennes du cours d'eau, respectivement, et  $K$  [sans dimension] un coefficient variant en pratique entre 25 et 200. En effet :

$$K = \frac{C_h (0,7C_h + 2\sqrt{g})}{g}$$

avec  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  l'accélération de la pesanteur, et  $C_h$  [ $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ] le coefficient de frottement de Chézy, variant en pratique entre 15 et 50, avec des valeurs courantes entre 20 et 30. En considérant une valeur maximale de  $C_h = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ , on obtient la formule simplifiée suivante, pour une évaluation grossière de la distance maximale de bon mélange  $L_{bm}$  :

$$L_{bm} \approx 27 \frac{B^2}{h}$$



**Pour un torrent de montagne**, une estimation rapide est proposée par Day (1977), cité par Boiten (2000) :

$$L_{bm} \approx 25 B$$

avec  $B$  [m] la largeur moyenne du cours d'eau. Cette formule est *a priori* applicable à des cours d'eau à fort mélange, comme un écoulement à travers une passe à poisson par exemple.

**Pour une conduite fermée en charge**, la formule de Dumas, Lièvre et Bonnin, citée par Bertrand-Krajewski et al. (2000) et André (1976) donne :

$$L_{bm} \geq 75 D_c$$

avec  $D_c$  [m] le diamètre de la conduite fermée.

### 7.2.3.2 Évaluation de la durée d'enregistrement

La durée d'enregistrement doit être suffisamment longue pour capturer la totalité du passage du nuage de traceur. En pratique, on attendra le retour à la valeur naturelle de conductivité ou fluorescence du cours d'eau.

L'appréciation visuelle de la durée de passage d'un nuage coloré permet également d'estimer la durée d'enregistrement au conductimètre ou fluorimètre. Noter avec précision la durée  $T_c$  s'écoulant entre l'injection du colorant et la disparition totale du colorant au niveau de la section de prélèvement. Noter également la durée  $T_p$  (temps de passage) s'écoulant entre l'apparition et la disparition du colorant au niveau de la section de prélèvement. Par précaution, on lancera l'enregistrement au plus tard au moment de l'injection du traceur, et on ne l'arrêtera après l'injection qu'au bout d'une durée d'enregistrement au moins égale à  $T_c + 10$  min, ou bien  $T_c + T_p$ .

Il est également possible d'apprécier la durée d'enregistrement à partir d'un premier essai, dans le cas où l'injection peut être répétée aisément.

### 7.2.3.3 Détermination de la masse de traceur à injecter

Une estimation du débit avant mesure est nécessaire pour estimer la masse de traceur à injecter, et étalonner le capteur-enregistreur. Il suffit d'obtenir une valeur approchée  $Q'$  telle que  $Q'/2 < Q < 2Q'$ . On pourra utiliser pour cela une estimation rapide de la vitesse moyenne  $V_m$  et de la surface  $S$  de la section mouillée, par une méthode simplifiée au flotteur [→ section 6].

On se fixe une valeur objectif de concentration  $C_{2opt}$  de  $C_{2m}$  qui assure une détection optimale du nuage par le capteur-enregistreur utilisé, en fonction de sa sensibilité. L'équation établie plus haut [→ section 7.1.2] permet de déterminer la masse  $M = Vol_1 C_1$  de traceur à injecter, en prenant  $T = T_c$ , la durée de passage du colorant mesurée précédemment :

$$M = Q' T_c C_{2opt}$$

En pratique, on prendra par précaution une masse supérieure à cette estimation, pour tenir compte de l'incertitude de cette détermination. Cette masse de traceur devra être diluée dans de l'eau déminéralisée de façon à obtenir une solution de concentration  $C_1$  et de volume  $Vol_1$  déterminés.

Dans le cas où plusieurs injections sont réalisées successivement de manière à répéter la mesure, le premier enregistrement permet de réévaluer la masse de traceurs à injecter, si la concentration moyenne  $C_{2m}$  enregistrée s'avère trop faible, ou au contraire inutilement forte, par rapport à la valeur objectif de concentration  $C_{2opt}$ .



## 7.2.4 Étalonnage du capteur

Les capteurs-enregistreurs habituellement employés pour le jaugeage par dilution mesurent une grandeur physique (conductivité électrique, fluorescence) qui est une fonction linéaire de la concentration en traceur, dans la gamme de concentration utilisée. Par exemple, pour le traceur salin NaCl, la conductivité électrique varie linéairement avec la concentration en-dessous de 5,8 g/L. Pour pouvoir enregistrer la concentration massique en traceur, il est nécessaire de les étalonner *in situ* en au moins deux points. Il convient de se référer à la documentation accompagnant le capteur utilisé, pour réaliser correctement cette opération.

On réalise tout d'abord un point zéro, à l'aide d'un prélèvement d'eau dans la rivière, réalisé avec un récipient propre de toute trace de traceur. La conductivité ou la fluorescence naturelle doit en effet être prise en compte, soit par correction du zéro de l'appareil de mesure, soit en retranchant la concentration correspondante  $C_0$  à l'enregistrement. Le niveau de conductivité (ou de fluorescence) naturelle est supposé constant pendant la durée de la mesure. La conductivité variant avec la température (variation relative de l'ordre de 2 à 3 % par °C), il est préférable de réaliser toutes les mesures à la température de l'eau de la rivière, même si les conductimètres corrigent la mesure de conductivité électrique à l'aide d'un thermomètre.

Ensuite, toujours avec l'eau prélevée dans la rivière, on effectue une série de dilutions étalons, à partir d'un échantillon de la solution de traceur à injecter dans la rivière (solution mère). Pour un traceur fluorescent, une seule solution de dilution

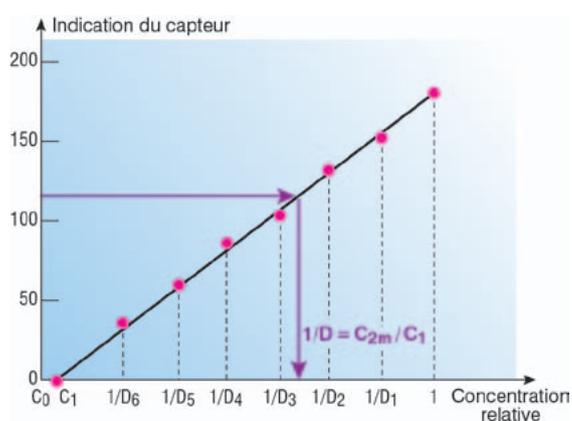


Fig. 7.4 - Droite d'étalonnage du capteur à partir de dilutions étalons  $D_i$ .

proche de la valeur estimée  $D' = Q' T_c / Vol_1$  peut suffire. Pour un traceur salin, il est conseillé de réaliser **une gamme comportant trois à sept dilutions et approximativement centrée sur la valeur escomptée  $D'$** . Habituellement, on exprime ces dilutions en concentration relative ( $1/D_i$ ), ce qui permet d'obtenir une série composée de multiples de puissances négatives de 10. Les valeurs des dilutions étalons sont reportées sur un graphique afin de tracer une droite d'étalonnage [→ fig. 7.4].

L'étalonnage du capteur-enregistreur gagne à être réalisé après l'enregistrement d'une injection. En effet, on dispose ainsi d'une idée précise de la gamme de variation de la conductivité ou de la fluorescence lors du passage du nuage, et donc une meilleure estimation de la gamme de dilution  $D'$  à étalonner.

## 7.2.5 Suivi de la concentration

Avant l'injection du traceur, le capteur-enregistreur est installé dans l'eau, si possible au centre de l'écoulement, sinon en berge. Pour s'assurer de l'homogénéité de la concentration, et pour une redondance de la mesure, il peut être utile d'installer un capteur de chaque côté de la rivière. Généralement, la courbe de variation de la concentration dans le temps doit présenter une forme régulière en cloche, avec retour au niveau de concentration de départ.

On choisira un pas de temps d'enregistrement le plus fin possible (1 à 30 s typiquement), de manière à bien décrire le signal de concentration sans saturer la capacité de mémoire de l'enregistreur. Le démarrage de l'enregistrement se fait au plus tard au moment de l'injection, et l'arrêt de l'enregistrement se fait au plus tôt après retour à la valeur naturelle de conductivité ou fluorescence du cours d'eau. Si l'on se réfère à des estimations de temps faites au traceur coloré, on enregistrera sur une durée égale ou supérieure à  $T_c + 10$  min, ou bien  $T_c + T_p$  [→ § 7.2.3.2].

## 7.3 Calcul du débit

### 7.3.1 Calcul de la concentration moyenne $C_{2m}$ au point d'enregistrement

Le calcul du débit se fait à partir de l'enregistrement de la concentration en traceur au point aval [→ fig. 7.5]. Ce traitement peut être assisté par un logiciel.

Il est également possible d'effectuer ou de vérifier le calcul très simplement lorsqu'on dispose de la série temporelle de concentration  $C_2(t)$ . Lorsque le zéro du capteur n'a pas été calé sur le niveau de base de l'eau de la rivière, il faut penser à retirer la concentration de base  $C_0$  à l'enregistrement. Sinon,  $C_0 = 0$  dans tout ce qui suit.

La durée d'intégration  $T$  correspond à la partie de l'enregistrement où la concentration est supérieure à  $C_0$  [→ fig. 7.5]. La concentration moyenne  $C_{2m}$  au point d'enregistrement est obtenue par intégration du signal  $C_2(t) - C_0$  :

$$C_{2m} = \frac{1}{T} \int_T (C_2(t) - C_0) dt$$

En pratique, si le pas de temps d'acquisition est suffisamment fin, on peut approcher l'intégration par la méthode des trapèzes :

$$C_{2m} = \frac{1}{T} \left[ \left( \frac{C_2(1) + C_2(2)}{2} - C_0 \right) (t_2 - t_1) + \dots + \left( \frac{C_2(n) + C_2(n+1)}{2} - C_0 \right) (t_n - t_{n-1}) \right]$$

### 7.3.2 Calcul du facteur de dilution et du débit

Le facteur de dilution  $D = C_1/C_{2m}$  est facilement déterminé connaissant la concentration de la solution injectée à l'amont (solution mère). Enfin, le débit est calculé avec l'équation établie plus haut [→ section 7.1.2] :

$$Q = \frac{Vol_1 D}{T} = \frac{M}{TC_{2m}}$$

#### → Exemple de jaugeage par dilution

On réalise l'injection d'un volume  $Vol_1 = 5$  L d'eau additionnée d'une masse  $M = 500$  g de sel, soit une concentration  $C_1 = 100$  g/L. Au point aval, le bon mélange est obtenu et on enregistre le signal de conductivité électrique illustré ci-contre. Pour le chlorure de sodium, la variation de conductivité est de  $1,86 \mu\text{S/cm}$  pour  $1$  mg/L de sel à  $18^\circ\text{C}$ , et la relation est linéaire jusqu'à  $5,8$  g/L. Le signal est très stable à  $144,70 \mu\text{S/cm}$  avant et après le passage du nuage salin.

En considérant cette valeur de conductivité naturelle ( $144,70 \mu\text{S/cm}$ ), on obtient :  $T = 1280$  s, une conductivité moyenne de  $34,15 \mu\text{S/cm}$  (cf. enregistrement de conductivité), c'est-à-dire une concentration moyenne :

$$C_{2m} = 34,14 / 1,86 = 18,36 \text{ mg/l.}$$

Ainsi le débit mesuré est :  $Q = 500\,000 / (1\,280 \times 18,36) = 21,3$  L/s.

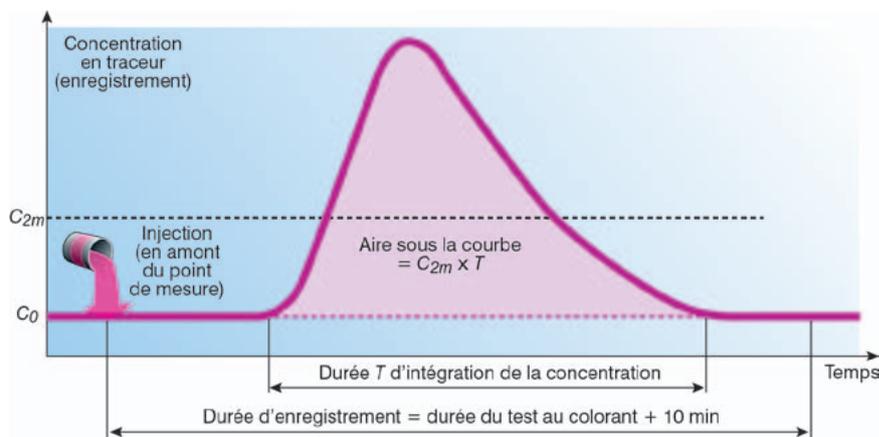
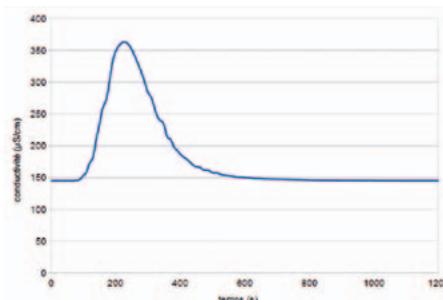


Fig. 7.5 - Établissement de la concentration moyenne  $C_{2m}$  au point d'enregistrement ( $C_0$  est la concentration de base des eaux pour le traceur considéré).



## 7.4 Calcul d'incertitude

### 7.4.1 Calcul détaillé

→ Se référer à la section 2.4 pour les notations et principes du calcul d'incertitude.

On applique la méthode GUM (NF ENV 13005, 1999) de propagation des incertitudes à la formule mathématique du jaugeage par dilution, complétée par des coefficients correcteurs  $k_1$  (mélange imparfait) et  $k_2$  (perte ou apport de traceur), chacun proche de 1 dans les bonnes conditions d'application :

$$Q = k_1 k_2 Vol_1 \times C_1 / (T \times C_{2m})$$

Les variables  $T$  et  $C_{2m}$  ne sont pas indépendantes (elles sont liées mathématiquement), donc il faut évaluer l'incertitude sur  $T \times C_{2m}$  (intégrale de la courbe de concentration), par exemple en faisant un test de sensibilité sur la valeur de concentration naturelle, ou, de façon équivalente, sur le temps de passage retenu.

De la même façon, les variables  $Vol_1$  et  $C_1$  sont en général liées (traceurs salins), et il faut directement évaluer l'incertitude sur la masse de traceur  $M = Vol_1 \times C_1$ .

$$u'_{Q^2} = u'_M{}^2 + u'_{TC_{2m}}{}^2 + u'_{k_1}{}^2 + u'_{k_2}{}^2$$

Les composantes d'incertitude  $u'_{k_1}$  et  $u'_{k_2}$  peuvent être évaluées à partir de mesures complémentaires : pour  $u'_{k_1}$ , mesures répétées pour différentes positions du capteur dans la section et différentes distances du point d'injection ; pour  $u'_{k_2}$ , mesures de cinétique de dégradation dans des échantillons tests. Dans les situations où l'historique de mesure ou l'expérience du jaugeur permettent de conclure que l'erreur de mélange et l'erreur de perte de traceur sont minimales, on négligera les termes  $u'_{k_1}$  et  $u'_{k_2}$  dans le calcul.

#### → Exemple de calcul d'incertitude sur un jaugeage par dilution

On reprend l'exemple de jaugeage par dilution présenté plus haut.

L'incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) sur la masse de sel  $M$  est estimée à 10 g, soit 2 % de 500 g. Ainsi,  $u'_M = 1$  %.

Pour évaluer l'effet d'une perte de traceur, ou d'une erreur de choix de temps de passage, on réalise un test de sensibilité sur la valeur  $C_0$  de conductivité naturelle. Ainsi, si l'on choisit  $C_0 = 145 \mu\text{S}/\text{cm}$ , on obtient un produit  $TC_{2m}$  sous-estimé de 7 %. Par ce moyen, on évalue  $u'_{TC_{2m}} = 3,5$  %.

L'incertitude-type combinée sur le débit est obtenue par :

$$u'_{Q^2} = 1^2 + 3,5^2 = 13,25 \quad \rightarrow u'_Q = 3,6 \text{ \% environ.}$$

Au final, on obtient une incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) sur le débit  $U'_Q = 7$  %.

On exprime le résultat comme suit :

$$Q = 21,3 \text{ L/s} \pm 1,5 \text{ L/s (niveau de confiance à 95 \%, } k = 2).$$

### 7.4.2 Estimation rapide

L'erreur principale sur un jaugeage par dilution provient d'un mauvais mélange du traceur au niveau du point de prélèvement, ce qui peut être vérifié par des tests au colorant, des mesures répétées, et des mesures en plaçant le capteur-enregistreur de part et d'autre de la section.

Si la condition de bon mélange est respectée, que le capteur-enregistreur est correctement étalonné et que le niveau de concentration de base est constant pendant la mesure, le principal risque d'erreur provient d'une perte de traceur par détournement (bras multiples), rétention (zones d'eau morte, marmites) ou adsorption/dégradation (cas de la rhodamine WT par les MES). Ce dernier problème engendre forcément une surestimation du débit mesuré (on mesure même un débit infini dans le cas d'une perte totale de traceur !), ce qui renforce la valeur d'un contrôle constatant une infraction. La perte de traceur peut être vérifiée à partir de l'intégration du signal mesuré.

En pratique, la réitération est très représentative de l'incertitude sur un débit jaugé par méthode de dilution, car les erreurs aléatoires dominent lorsque le bon mélange est atteint et qu'il n'y a pas de perte de traceur. Une estimation rapide de l'incertitude consiste donc à répéter la mesure au moins trois fois de suite, soit  $n \geq 3$  mesures successives  $Q_i$ , pour un écoulement à débit stable et dans les mêmes conditions de mesure. Les formules suivantes peuvent alors être appliquées [→ explications section 2.4.2.2] :

- Si  $n \geq 6$ , prendre :

$$u'_Q = \frac{\text{écart-type}(Q_i)}{\text{moyenne}(Q_i)}$$

- Si  $n < 6$ , on considère une loi de distribution rectangulaire [→ GUM ISO], ce qui implique :

$$u'_Q = \frac{\max(Q_i) - \min(Q_i)}{\sqrt{3} \text{ moyenne}(Q_i)}$$

Rappel : l'incertitude élargie finale (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) dont il faut assortir la mesure de débit vaut :

$$U'_Q = 2 \times u'_Q \text{ (en \%)}$$

Le résultat final sera la moyenne des débits  $Q_i$  ainsi obtenus successivement. L'écart entre chacun des débits  $Q_i$  et la moyenne  $Q$  doit être inférieur à 5 % pour que le mélange réalisé dans la rivière puisse être considéré comme acceptable.

### 7.4.3 Valeurs usuelles

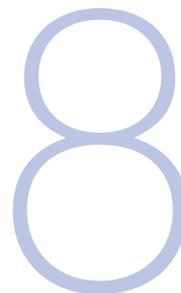
On retiendra les valeurs suivantes, usuellement rencontrées pour l'incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) :

- dans les bonnes conditions d'application, le jaugeage par dilution est réputé la moins incertaine des méthodes hydrométriques :  $U'_Q \approx 3\%$  ;
- des conditions dégradées peuvent entraîner des incertitudes de 10 %, voire plus, avec toutefois un biais positif (surestimation) dans le cas d'une perte ou rétention du traceur.

Dans le cas d'un contrôle, et dans les bonnes conditions d'application, on retiendra une valeur maximale de  $U'_Q = 5\%$ , hors effets de surestimation liés à une perte de traceur ou à un calcul de temps de passage  $T$  trop court (10 % dans ce cas).

Les valeurs usuelles et limites de l'incertitude élargie  $U'_Q$  sont résumées dans le tableau comparatif Annexe B pour chaque méthode de jaugeage.

# Méthodes hydrauliques



## 8.1 Généralités

Ces méthodes peuvent être mises en œuvre lorsque l'écoulement se produit sur des ouvrages de structure bien déterminée pour lesquels une relation stable et univoque existe entre le débit  $Q$  et la hauteur d'eau  $h$  à l'amont de l'ouvrage. Sur un cours d'eau, on peut rencontrer plusieurs sortes d'ouvrages hydrauliques : déversoirs, vannes, orifices, canaux-jaugeurs, stations hydro-métriques, passes à poissons, etc.

La relation hauteur/débit peut être établie à partir d'essais réalisés en laboratoire ou sur le site : on parle alors d'ouvrage ou de section étalonnés ou tarés. Elle peut également être estimée à partir de lois théoriques correspondant à des ouvrages de géométrie donnée. Ces formules hydrauliques comportent **des coefficients prédéterminés** qui résultent d'un grand nombre d'essais réalisés en laboratoire dans des conditions standard très rigoureuses concernant l'écoulement, la construction et l'installation des ouvrages. La loi de tarage  $Q = f(h)$  peut se présenter sous la forme d'une courbe ou d'un tableau (ou « barème ») donnant directement la correspondance hauteur débit, ou d'une formule hydraulique comportant un ou plusieurs coefficients. Le débit est simplement obtenu à partir de la hauteur d'eau amont (mesurée à l'endroit prévu par l'étalonnage) et de la courbe, tableau ou formule d'étalonnage  $Q(h)$  théorique ou empirique.

Le niveau d'incertitude que l'on peut attendre de ces méthodes dépend :

- du soin apporté à la réalisation des mesures ;
- de la qualité de l'étalonnage et, dans le cas d'utilisation de formules, du choix des coefficients ;
- de l'applicabilité de la loi d'étalonnage, en fonction des caractéristiques réelles de l'ouvrage et de l'écoulement.

Si les spécifications concernant l'installation de l'ouvrage et la réalisation des mesures sont rigoureusement respectées, on peut atteindre un niveau d'incertitude de l'ordre de 5 % en employant certains déversoirs dans les conditions normalisées [→ normes NF X10-314, 1983 ; NF X10-315, 1990 ; ISO 1438, 2008].

L'incertitude que l'on peut attendre de l'application d'une formule hydraulique sur un ouvrage non étalonné dépendra de l'écart entre les conditions des tests en laboratoire et les conditions réelles de mesure sur le site (géométrie et écoulement réels).

On peut citer les deux types de situations extrêmes suivantes entre lesquelles existent de nombreuses situations intermédiaires :

- ouvrage bien usiné (matériaux lisses, surfaces planes et régulières, arêtes franches et rectilignes) et en bon état, bien positionné (horizontalité, verticalité),

ayant des caractéristiques proches d'ouvrages standard, bonnes conditions d'écoulement (homogène et perpendiculaire à l'ouvrage), pour lequel l'incertitude sur le débit peut se réduire à 10 % ;

- ouvrage à aspect irrégulier, plutôt mal entretenu, mal positionné, mal étanchéifié, mauvaises conditions d'écoulement, pour lequel on ne doit pas espérer obtenir moins que 40 % d'incertitude sur le débit.

Il est important de signaler que **les formules et leurs coefficients**<sup>1</sup> **ne sont valables que dans certaines limites** (toute la gamme des situations possibles n'ayant pas été testée en laboratoire). Il faut donc bien vérifier, avant d'employer une formule, que l'on est bien à l'intérieur de la plage d'utilisation conforme.

Les ouvrages sur lesquels le débit est contrôlé au titre de l'article L. 214-18 du Code de l'environnement ne sont pas tous pourvus d'un dispositif de restitution du débit minimal étalonné. Cependant, la réglementation impose aux exploitants, lors de toute nouvelle construction ou de tout renouvellement d'autorisation ou de concession, l'installation d'un dispositif étalonné permettant le contrôle permanent du débit maintenu dans la rivière<sup>2</sup>.

## 8.2 Mode opératoire

### 8.2.1 Recommandations

La détermination du débit sur un ouvrage hydraulique nécessite de mesurer la hauteur d'eau à l'amont et de déterminer certains éléments de la géométrie de l'ouvrage :

- effectuer **un croquis détaillé et coté** de l'ouvrage ;
- mentionner également le maximum d'observations concernant les caractéristiques de l'écoulement et l'état de l'ouvrage ;
- appuyer les observations par des photographies.

Avant de commencer les relevés, prendre les précautions suivantes :

- noter si l'entretien du dispositif est optimal (non accumulation de débris et sédiments sur la face amont de l'ouvrage, obstacle à l'écoulement en aval susceptible de remonter artificiellement le niveau du plan d'eau) ;
- vérifier l'étanchéité et l'alignement de l'ouvrage (il doit être horizontal et perpendiculaire à la direction principale de l'écoulement).

### 8.2.2 Mesure de la charge amont

Toutes les méthodes hydrauliques ont en commun la mesure de la charge  $H$  à l'amont du dispositif. En toute rigueur, la mesure de la charge doit être estimée selon l'équation :

$$H = h + \frac{v_{moy}^2}{2g}$$

- $h$  la hauteur d'eau [m] mesurée à l'amont du dispositif par rapport à l'écoulement sur le dispositif (crête d'un déversoir, centre d'un orifice, etc.) ;
- $v_{moy}$  est la vitesse moyenne sur la verticale.

Cependant, en pratique, le terme  $v_{moy}^2 / (2g)$  est le plus souvent négligeable. La charge  $H$  est donc souvent assimilée à la hauteur d'eau  $h$  mesurée à l'amont du dispositif.

1 - N.B. On ne retrouvera pas forcément dans ce chapitre les formules telles qu'elles apparaissent habituellement dans les ouvrages traitant d'hydraulique. Il s'agit bien ici de formules équivalentes, mais leur présentation a été simplifiée au maximum pour qu'elles soient immédiatement et facilement utilisables, notamment sur le terrain.

2 - Ce chapitre n'a pas pour objet d'apporter des éléments pour aider au choix et à la construction de tels équipements, mais traite seulement de la possibilité d'utiliser les ouvrages en place (étalonnés ou non) pour la mesure des débits.

→ **Attention à ne pas perturber la surface de l'eau lors de la lecture de cette hauteur.** L'endroit exact où doit être effectué ce relevé dépend du type d'ouvrage.

### ■ Pour les écoulements sur les dispositifs étalonnés

Il faut se conformer aux spécifications de l'étalonnage : la hauteur d'eau doit se mesurer à l'endroit précis où elle a été mesurée lors de l'étalonnage. Généralement, une échelle graduée est installée à l'amont de l'ouvrage permettant la lecture directe de la hauteur d'eau. S'il n'y a pas d'échelle, on doit se renseigner auprès du service gestionnaire sur les conditions d'étalonnage de l'ouvrage.

### ■ Pour les écoulements sur les dispositifs non étalonnés

On peut distinguer le cas des orifices, des vannes et des départs de buse et dalot et le cas des déversoirs :

- pour les orifices, les vannes et les départs de buse et dalot, la hauteur d'eau se mesure directement sur la face amont de l'ouvrage, par exemple à l'aide d'un mètre rigide que l'on applique contre la paroi amont de l'ouvrage.

→ **Attention** : dans le cas de l'orifice dénoyé, la hauteur d'eau mesurée correspond en fait à la hauteur d'eau au dessus du centre de l'orifice ;

- pour les déversoirs, la mesure est plus délicate à réaliser car elle doit être déportée plus à l'amont, pour être située en dehors de la zone de courbure de la surface du plan d'eau due à la chute. Habituellement, la hauteur d'eau  $h$  se mesure à une distance d'environ  $3h$  à partir de la crête du déversoir [→ fig. 8.1]. → **Attention** : dans le cas des déversoirs, la hauteur d'eau mesurée correspond en fait à une lame déversante (hauteur d'eau au dessus de la crête du déversoir).

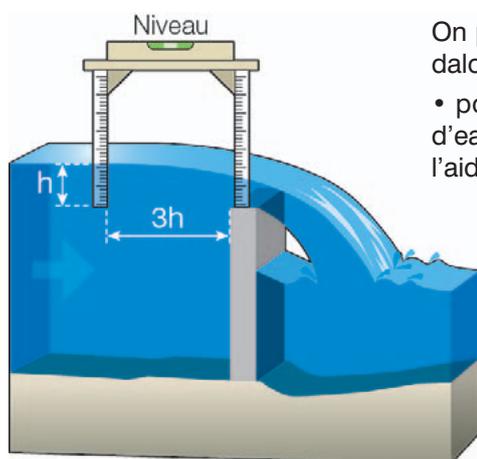


Fig. 8.1 - Principe de mesure de la hauteur d'eau amont dans le cas d'un déversoir.

### ■ Mesure de la hauteur d'eau amont par la méthode au piquet

Afin de faciliter le relevé de la hauteur d'eau à l'amont d'un déversoir, un dispositif simple [→ fig. 8.2] peut être mis en œuvre (matériel nécessaire : réglet, équerre, niveau à bulle, piquet, etc.) :

- enfoncer un piquet dans le lit du cours d'eau à environ  $3h$  en amont du déversoir ;
- poser une pigne graduée sur la crête du déversoir (le zéro de la pigne coïncidant bien avec le niveau de la crête) ;
- à l'aide d'une planche bien plane et d'un niveau, reporter le sommet de cette pigne sur le piquet et marquer ce point ;
  - placer la pigne (le zéro étant vers le bas) contre le piquet en faisant coïncider le sommet de la pigne avec la marque effectuée précédemment ;
  - la lecture de la cote du plan d'eau sur la pigne donne ainsi la hauteur  $h$ .

→ **Attention** : la mesure de la charge (assimilée à une hauteur d'eau  $h$ ) est spécifique à chacun des types d'ouvrage. Deux points importants sont à vérifier [→ section 8.2.2] :

- la position du point de mesure par rapport à l'ouvrage ;
- l'altitude de la référence par rapport à la mesure de surface (crête d'un seuil, centre d'un orifice, base d'une buse ou d'un dalot, ou fond).

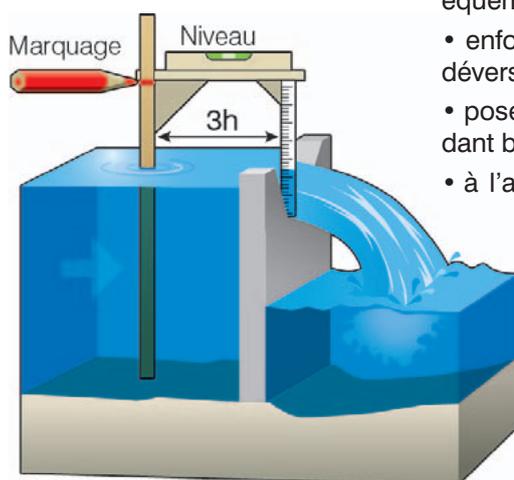


Fig. 8.2 - Méthode de mesure dans le cas d'une plaque comportant un déversoir avec l'aide d'un piquet.

## 8.2.3 Détermination de la géométrie de l'ouvrage

Dans de nombreux cas, il faut connaître, en plus de la charge amont, la géométrie de l'ouvrage. Celle-ci est établie à partir de la mesure de certaines dimensions : largeur, hauteur de pelle, angle de l'échancrure, diamètre de l'orifice, etc. On consignera pour chaque mesure l'appareil avec lequel elle a été réalisée (mètre ruban, équerre, rapporteur, appareil topographique, etc.).

## 8.3 Formules pour déversoirs

### 8.3.1 Généralités

Un déversoir est une construction hydraulique en travers d'un cours d'eau au-dessus de laquelle l'eau se déverse [→ fig. 8.3]. Une synthèse des lois d'écoulement au droit de tels ouvrages [Laborie et Ladreyt, 2005] est disponible sur le site internet du Cetmef<sup>3</sup>. La ligne ou la surface au dessus de laquelle s'effectue le déversement est appelée seuil ou crête du déversoir. La hauteur entre le lit et le point le plus bas de la crête du déversoir, mesurée en amont de celui-ci, est la hauteur de pelle  $p$ .

On distingue les déversoirs à seuil épais [→ fig. 8.3a], pour lesquels la hauteur d'eau  $h$  au-dessus du seuil mesurée à l'amont est faible par rapport à l'épaisseur  $e$  de la crête ( $h < 1,6 e$ ) ; et les déversoirs en mince paroi [→ fig. 8.3b], habituellement constituée par une plaque métallique, et dont la crête présente une arête ( $h > 2 e$ ), soit rectiligne, soit découpée en échancrure de forme géométrique (rectangulaire, triangulaire, circulaire, etc.).

Les formules pour les déversoirs se présentent toutes sous la forme suivante :

$$Q = C \sqrt{2g} b h^n$$

- $Q$  est le débit [ $m^3/s$ ] ;
- $b$  la largeur du déversoir [ $m$ ] ;
- $h$  la hauteur d'eau [ $m$ ] (lame d'eau) mesurée au-dessus de la crête du seuil à une distance vers l'amont d'environ  $3h$  ;
- $n$  un exposant lié à la géométrie du déversoir ;
- $C$  un coefficient de débit à déterminer.

Nous pouvons poser l'accélération de la pesanteur  $g$  comme constante ( $g = 9,81 m/s^2$ ). Le terme  $\sqrt{2g} = 4,43$  est parfois intégré dans le coefficient de débit.

Il existe aussi des déversoirs courts avec une épaisseur intermédiaire ( $h > 1,6 e$  et  $h < 2 e$ ). Cependant, il n'y a pas de formules normalisées pour ce type de déversoir. Le coefficient de débit peut être estimé en interpolant les valeurs obtenues à partir des formules pour les déversoirs à seuil épais et pour les déversoirs à lame mince [→ exemple 8.3.3].

**Recommandations générales concernant l'emploi des formules pour déversoirs** : les formules présentées dans ce paragraphe ne sont applicables qu'à des déversoirs dénoyés. Un déversoir est dénoyé lorsque le niveau aval n'a pas d'influence sur le niveau amont, donc sur le débit. Pour simplifier, on peut considérer que cette condition est remplie dans tous les cas lorsque la cote aval se situe nettement au-dessous de la cote de la crête du seuil, ce qui

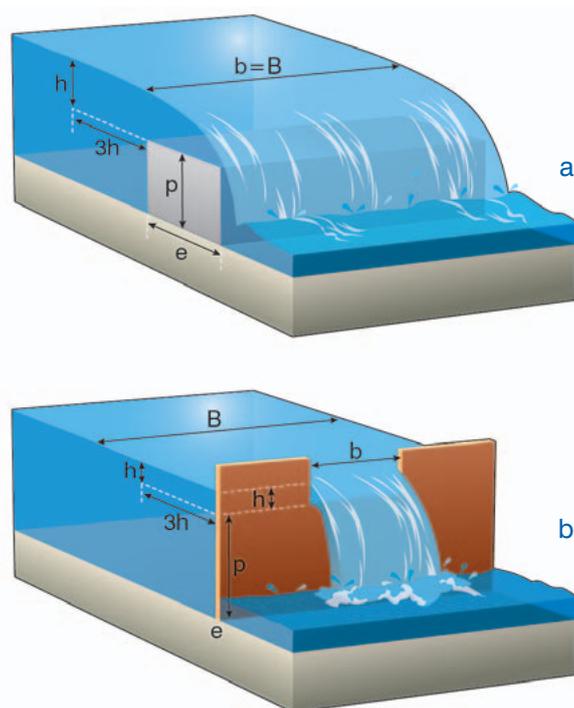


Fig. 8.3 - Déversoirs à seuil épais (a) et en mince paroi (b).

<sup>3</sup> - Centre d'études techniques maritimes et fluviales.

s'observe généralement pour les faibles débits. Plus précisément, les hauteurs d'eau, mesurées à l'amont  $h_{am}$  et à l'aval  $h_{av}$ , doivent vérifier la relation  $h_{av} / h_{am} \leq 0,6$  pour les seuils épais. Dans le cas des seuils en mince paroi, le niveau d'eau à l'aval du seuil doit être suffisamment au-dessous de la crête de seuil pour assurer un déversement libre et pleinement aéré. On obtient un déversement pleinement aéré lorsque la pression de l'air sur la surface inférieure de la lame déversante est égale à la pression atmosphérique. On prendra au minimum une hauteur de chute  $h_{chute} = h_{am} - h - h_{av} > 5$  cm. De plus, il faut que la lame déversante soit bien décollée à l'aval de la paroi du seuil.

Enfin, l'emploi de ces formules est à utiliser avec précaution lorsque la hauteur d'eau sur le seuil est très faible par rapport à la largeur de la lame déversante. En effet, dans ce cas, une petite incertitude sur la hauteur d'eau entraîne une forte incertitude sur le débit.

### 8.3.2 Déversoirs rectangulaires à seuil épais

L'équation ci-après s'applique aux déversoirs à seuil épais ( $h < 1,6e$ ) ayant une section transversale rectangulaire :

$$Q = C \sqrt{2g} b h^{1,5}$$

Le coefficient de débit  $C$  dépend de la forme de la section longitudinale du déversoir, ainsi que des rapports  $h/e$  et  $h/p$  [→ tabl. 8.1, 8.2, 8.3 et 8.4].

Tabl. 8.1 - Expression du coefficient de débit  $C$  pour un seuil épais de section transversale rectangulaire, triangulaire ou trapézoïdale.

<p><b>Crête plane à arêtes vives</b> Profil longitudinal rectangulaire</p> $Q = C \sqrt{2g} b h^{1,5}$ $C = 0,385 A_1$ <p>(cf. tabl. 8.2)</p>	
<p><b>Crête plane de forme arrondie à l'amont</b> Rayon de la courbure <math>R</math> supérieur à <math>0,1h</math></p> $Q = C \sqrt{2g} b h^{1,5}$ $C = 0,424 A_1$ <p>(cf. tabl. 8.2)</p>	
<p><b>Crête inclinée vers l'amont et l'aval</b> Profil longitudinal de forme triangulaire</p> $Q = C \sqrt{2g} b h^{1,5}$ $C = A_2$ <p>(cf. tabl. 8.3)</p>	
<p><b>Crête plane avec bords inclinés</b> Profil longitudinal de forme trapézoïdal</p> $Q = C \sqrt{2g} b h^{1,5}$ $C = A_3$ <p>(cf. tabl. 8.4)</p>	

La valeur du coefficient de débit  $A_1$  [→ tabl. 8.1] pour les seuils épais rectangulaires peut être obtenue en utilisant le tableau 8.2 (d'après la norme NF X10-315, 1990). Les valeurs recommandées sont celles qui ne sont pas griséées.

Pour les faibles valeurs de  $h/p$  (vitesses d'approche très faibles), le coefficient de débit  $C$  pour un seuil épais rectangulaire à arêtes vives varie de 0,33 (seuil très épais) à 0,42 (limite déversoir en lame mince). Pour les fortes valeurs de  $h/p$  (vitesses d'approche importantes),  $C$  varie de 0,38 à 0,48.

Une crête plane de forme arrondie à l'amont permet de supprimer le décollement de l'écoulement et implique un débit plus fort pour une même charge. Si le rayon de la courbure  $R$  est supérieur à  $0,1h$  (le rayon de courbure correspond au rayon du cercle tangent aux parois verticales et horizontales du seuil et permettant de décrire la forme arrondie de la crête), le coefficient de débit est alors 10 % plus grand que pour le cas avec arêtes vives.

→ Limites d'application de la formule :

$$h \geq 0,06 \text{ m}, \quad p \geq 0,15 \text{ m}, \quad b \geq 0,3 \text{ m}, \\ 0,1 < e/p < 4,0, \quad 0,1 < h/e < 1,6, \quad h/p < 1,6$$

Les coefficients de débit pour un seuil épais triangulaire ou trapézoïdal sont tirés de Lencastre (1986). Les tableaux 8.3 et 8.4 ont été établis pour une hauteur de pelle  $p \approx 0,5$  m. Pour des hauteurs de pelle différentes, ces valeurs ne sont donc qu'indicatives.

h/p	h/e																	
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
0,1	0,850	0,850	0,850	0,861	0,870	0,885	0,893	0,925	0,948	0,971	0,993	1,016	1,039	1,062	1,085	1,106	1,130	1,148
0,2	0,855	0,855	0,855	0,864	0,874	0,888	0,907	0,930	0,954	0,977	1,001	1,026	1,050	1,074	1,096	1,120	1,142	1,159
0,3	0,864	0,864	0,864	0,868	0,879	0,894	0,913	0,936	0,961	0,986	1,011	1,037	1,061	1,085	1,110	1,132	1,152	1,169
0,4	0,873	0,873	0,873	0,874	0,885	0,901	0,920	0,945	0,969	0,995	1,021	1,047	1,072	1,097	1,122	1,144	1,163	1,180
0,5	0,882	0,882	0,882	0,883	0,894	0,909	0,929	0,954	0,978	1,005	1,032	1,057	1,083	1,109	1,133	1,154	1,173	1,188
0,6	0,892	0,892	0,892	0,894	0,904	0,920	0,941	0,964	0,990	1,016	1,043	1,067	1,094	1,120	1,143	1,164	1,182	1,196
0,7	0,901	0,901	0,901	0,906	0,916	0,932	0,952	0,975	1,000	1,026	1,052	1,077	1,104	1,129	1,152	1,171	1,188	1,203
0,8	0,911	0,911	0,912	0,916	0,926	0,942	0,962	0,985	1,010	1,036	1,062	1,086	1,112	1,136	1,158	1,176	1,194	1,209
0,9	0,921	0,921	0,922	0,926	0,936	0,952	0,972	0,996	1,021	1,046	1,072	1,096	1,120	1,143	1,163	1,181	1,199	1,214
1,0	0,929	0,929	0,931	0,936	0,946	0,962	0,982	1,006	1,031	1,056	1,081	1,106	1,128	1,150	1,169	1,187	1,204	1,220
1,1	0,935	0,937	0,940	0,946	0,956	0,972	0,993	1,017	1,042	1,066	1,092	1,115	1,138	1,159	1,177	1,195	1,212	1,228
1,2	0,941	0,944	0,949	0,956	0,966	0,982	1,004	1,028	1,053	1,077	1,103	1,126	1,148	1,168	1,186	1,204	1,222	1,237
1,3	0,946	0,951	0,957	0,966	0,977	0,993	1,016	1,040	1,063	1,089	1,114	1,136	1,158	1,178	1,196	1,214	1,232	1,250
1,4	0,953	0,959	0,967	0,975	0,986	1,005	1,028	1,050	1,075	1,101	1,124	1,147	1,168	1,187	1,206	1,224	1,244	1,266
1,5	0,961	0,968	0,975	0,984	0,997	1,018	1,040	1,061	1,088	1,111	1,134	1,156	1,176	1,196	1,215	1,235	1,258	1,277
1,6	0,972	0,978	0,985	0,994	1,010	1,030	1,050	1,073	1,096	1,119	1,142	1,164	1,184	1,204	1,224	1,245	1,268	1,289

Tabl. 8.2 - Coefficient A1 pour un seuil épais rectangulaire (norme NF X10-315, 1990).



h/p	$i_{am}$											
	1/2	1/1	1/1	1/1	2/1	3/1	vert.	vert.	vert.	vert.	vert.	vert.
h/p	$i_{av}$											
	1/2	1/1	1/2	1/3	1/2	1/2	1/1	1/2	1/3	1/5	1/10	
0,12	-	-	0,476	-	-	0,455	0,480	0,444	-	0,384	0,352	
0,18	0,480	0,531	0,474	0,443	0,462	0,454	0,480	0,433	0,361	-	-	
0,24	0,477	0,524	0,470	0,439	0,459	0,454	0,480	0,433	0,388	0,380	0,356	
0,3	0,475	0,516	0,470	0,434	0,460	0,457		0,438	0,401	-	-	
0,36	0,475	0,512	0,472	0,431	0,464	0,459	0,480	0,441	0,406	0,389	0,363	
0,42	0,477	0,512	0,476	0,430	0,465	0,460		0,445	0,415	-	-	
0,48	0,481	0,512	0,479	0,431	0,465	0,460	0,480	0,446	0,420	0,390	0,363	
0,54	0,482	0,511	0,480	0,433	0,466	0,460		0,446	0,424	-	-	
0,6	0,482	0,509	0,480	0,434	0,466	0,460	0,480	0,446	0,424	0,390	0,365	
0,72	0,482	0,490	0,480	0,433	0,465	0,459		0,447	0,425	-	-	
0,9	0,482	0,467	0,479	0,431	0,462	0,456		0,445	0,425	-	-	

Tabl. 8.3 - Coefficient A2 pour un seuil épais triangulaire avec  $p \approx 0,5 m$  (Lencastre, 1986).

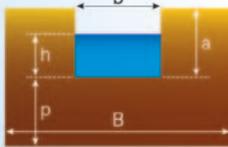
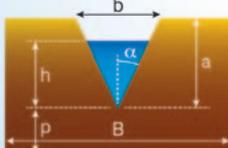
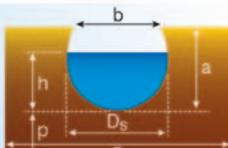
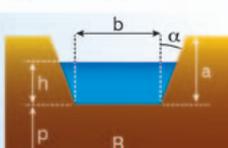
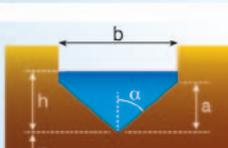
$i_{am}$	vert.	3/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	1/1	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1/4	1/5
$i_{av}$	1/2	1/2	1/1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/2	1/4	1/6	1/2	1/2	1/5	vert.	vert.	vert.	vert.	vert.
e/p	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,8	0,8	0,8	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4
$h_{1s}/p$																		
0,12	0,318	0,312	0,337	0,339	0,337	0,339	0,339	-	-	-	0,340	0,352	-	-	-	-	-	-
0,18	0,322	0,327	0,352	0,348	0,344	0,342	0,349	0,338	0,344	-	0,356	0,366	-	-	-	-	-	-
0,24	0,332	0,343	0,360	0,353	0,349	0,354	0,356	0,345	0,349	0,348	0,364	0,379	-	-	-	-	-	-
0,3	0,345	0,358	0,376	0,364	0,363	0,359	0,359	0,349	0,352	0,349	0,376	0,390	-	-	-	-	-	-
0,36	0,361	0,373	0,400	0,378	0,374	0,371	0,365	0,349	0,35	0,352	0,389	0,399	-	-	-	-	-	-
0,42	0,373	0,385	0,404	0,391	0,383	0,381	0,376	0,354	0,355	0,355	0,400	0,406	-	-	-	-	-	-
0,48	0,385	0,396	0,416	0,408	0,391	0,389	0,384	0,359	0,359	0,358	0,410	0,414	-	-	-	-	-	-
0,54	0,396	0,408	0,429	0,414	0,400	0,395	0,389	0,365	0,363	0,361	0,419	0,421	-	-	-	-	-	-
0,6	0,406	0,416	0,439	0,421	0,408	0,400	0,395	0,371	0,366	0,365	0,426	0,428	-	0,480	0,425	-	-	-
0,72	0,423	0,431	0,456	0,436	0,420	0,409	0,403	0,384	0,375	0,371	0,440	0,438	-	-	-	-	-	-
0,9	0,438	0,443	0,476	0,450	0,430	0,418	0,406	0,401	0,386	0,384	0,455	0,450	-	0,476	0,445	-	-	-
1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,444	0,440	0,472	0,455	0,445	0,434	0,423
1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,445	0,434	0,470	0,461	0,445	0,434	0,423
1,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,446	0,429	0,467	0,464	0,445	0,434	0,423
2,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,449	0,428	0,465	0,464	0,445	0,434	0,423
2,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,451	0,434	0,461	0,465	0,445	0,434	0,423
2,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,455	0,441	0,457	0,465	0,445	0,434	0,423
3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,459	0,445	0,454	0,465	0,445	0,434	0,423

Tabl. 8.4 - Coefficient A3 pour un seuil épais trapézoïdal avec  $p \approx 0,5 m$  (Lencastre, 1986).

Pour le cas d'un seuil épais trapézoïdal, le coefficient de débit ne peut être estimé que pour un certain nombre de cas particulier. Le tableau 8.4 montre de nombreuses lacunes (géométries où aucune mesure n'a été réalisée).

### 8.3.3 Déversoirs en mince paroi

Le tableau 8.5 donne un certain nombre de formules correspondant aux déversoirs en mince paroi les plus courants. Pour ce tableau, les notations suivantes sont utilisées :

<p><b>Section rectangulaire</b></p> $Q = C \sqrt{2g} b h^{1,5}$ <p>avec <math>C = C'_1 = 0,40 + C_r \frac{h}{p}</math></p> <p>Limites d'application <math>h/p \leq 2,5</math> ; <math>b \geq 0,15</math> m <math>h \geq 0,03</math> m ; <math>p \geq 0,10</math> m</p>	
<p><b>Section triangulaire isocèle</b></p> $Q = C \sqrt{2g} \tan \alpha h^{2,5}$ <p>avec <math>C = C'_2 = 0,31</math></p> <p>Limites d'application <math>10 \leq \alpha \leq 50</math> degrés <math>h/p \leq 0,35</math> ; <math>h \geq 0,06</math> m <math>0,10 \leq p/b \leq 1,5</math> ; <math>p \geq 0,09</math> m</p>	
<p><b>Section circulaire</b></p> $Q = C \sqrt{2g} D_s^{2,5}$ <p>avec <math>C = C_c</math></p> <p>Limites d'application <math>0,1 \leq D_s \leq 1</math> m ; <math>B &gt; 2D</math> <math>p &gt; 0,1</math> m ; <math>p \geq D_s/2</math> <math>0,1 \leq h/D_s \leq 1</math> ; <math>h &gt; 0,03</math> m</p>	
<p><b>Section trapézoïdale</b></p> $Q = C'_1 \sqrt{2g} b h^{1,5} + C'_2 \sqrt{2g} \tan \alpha h^{2,5}$ <p>Limites d'application <math>h/p \leq 2,5</math> ; <math>b \geq 0,15</math> m <math>h \geq 0,03</math> m ; <math>p \geq 0,10</math> m</p>	
<p><b>Section triangulaire isocèle tronquée</b></p> $Q = C'_2 \sqrt{2g} \tan \alpha \times [h^{2,5} - (h - a)^{2,5}]$ <p>Limites d'application <math>10 \leq \alpha \leq 50</math> degrés <math>h/p \leq 0,35</math> ; <math>h \geq 0,06</math> m <math>0,10 \leq p/b \leq 1,5</math> ; <math>p \geq 0,09</math> m</p>	

Tabl. 8.5 - Expression de débit  $Q$  pour plusieurs géométries de déversoir en mince paroi (les coefficients  $C_r$  et  $C_c$  sont obtenus à partir des abaques Fig. 8.4).

- $Q$  est le débit sur le déversoir [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] ;
- $C$  un coefficient de débit [-] ;
- $b$  la largeur [m] du déversoir ou de l'échancrure (si déversoir à contraction latérale) ;
- $\alpha$  le demi angle au sommet de l'échancrure (si déversoir triangulaire,  $\tan \alpha = b/(2a)$ ) ;
- $a$  la hauteur [m] de l'ouverture ;
- $D_s$  le diamètre du seuil [m] (si déversoir circulaire) ;
- $B$  la largeur du chenal d'écoulement ;
- $h$  la hauteur d'eau [m] (lame d'eau) mesurée au dessus de la crête du seuil à une distance vers l'amont d'environ  $3h$ .

Un déversoir est dit à contraction latérale lorsque le lit et les bords du canal d'approche, en amont du déversoir, sont suffisamment éloignés des bords du déversoir pour obtenir un parallélisme longitudinal du profil des vitesses d'approche en amont du déversoir, soit :  $(B - b)/2 \geq 0,10$  m. Le tableau 8.5 correspond à des déversoirs à contraction latérale. Si cette condition n'est pas respectée, le déversoir est partiellement contracté, le coefficient de débit calculé par les équations proposées sera légèrement sous estimé (1 à 2 %).

Le coefficient  $C_r$  (utile au calcul de débit du déversoir rectangulaire en mince paroi) est fonction de  $b/B$ . Sa valeur peut être obtenue en utilisant l'abaque ci-dessous [→ fig. 8.4a]. Le coefficient  $C_c$  (utile au calcul de débit du déversoir circulaire en mince paroi) dépend de  $h/D_s$  et peut être obtenu en utilisant l'abaque [→ fig. 8.4b].

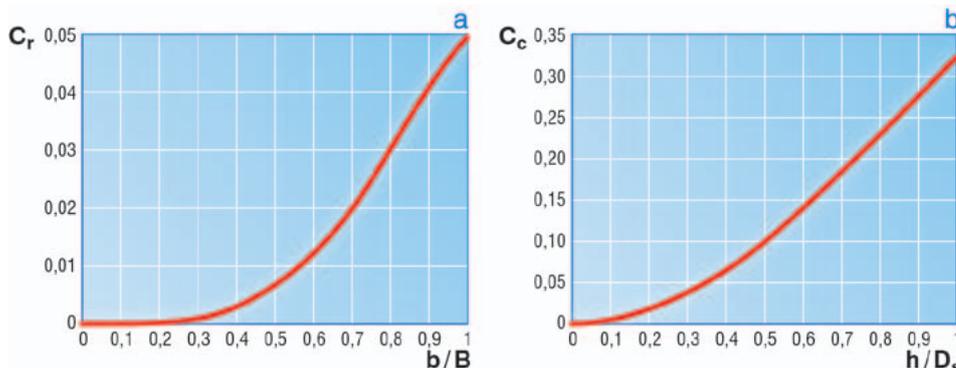


Fig. 8.4 - Abaque pour le calcul du coefficient  $C_r$  pour un déversoir rectangulaire en mince paroi (a) et du coefficient  $C_c$  pour un déversoir circulaire en mince paroi (b).

### → Exemple de calcul du coefficient de débit pour un déversoir rectangulaire

Soit un déversoir rectangulaire de largeur  $b = B = 1$  m (largeur du déversoir = largeur du canal), de hauteur de pelle  $p = 1$  m, et d'épaisseur  $e = 5$  cm, pour une hauteur d'eau au dessus du déversoir de  $h = 9$  cm, quel est le coefficient de débit si on applique la formule générale :  $Q = C\sqrt{2g} b h^{1,5}$  (déversoir bien entretenu et avec de bonnes conditions hydrauliques d'approche) ?

On a  $h/e = 1,8$  ; on a donc ici affaire à un déversoir avec une épaisseur intermédiaire.

1/ En le considérant comme un déversoir à seuil épais à arêtes vives, on obtient :

$C = 0,385 A_1$  avec  $A_1 = 1,148$  [cf. tabl. 8.2,  $h/e = 1,8$  et  $h/p \approx 0,1$ ], soit  $C = 0,442$ .

On peut noter que dans le cas d'un déversoir rectangulaire à seuil, le coefficient de débit  $C$  est très sensible à la forme amont du seuil.

2/ En le considérant comme un déversoir à lame mince, on obtient :

$C = 0,40 + C_r \times 0,09$  avec  $C_r = 0,05$  (cf. fig. 8.4a avec  $b = B$ ), soit  $C = 0,405$ .

On peut noter que dans le cas d'un déversoir rectangulaire à lame mince, le coefficient de débit  $C$  reste proche de la valeur 0,4.

On peut donc prendre comme valeur du coefficient de débit  $C = 0,42$ .

## 8.3.4 Déversoirs rectangulaires sans pelle

Cette formule peut être appliquée aux chenaux présentant une section transversale rectangulaire, et un fond rectiligne, plat ou en très légère pente, dont l'extrémité est découpée perpendiculairement à son axe, formant une cassure franche ou marche [→ fig. 8.5]. Les parois du chenal peuvent se prolonger à l'aval de cette cassure (lame déversante dite confinée) ou s'interrompre à son niveau (lame déversante dite non confinée).

$$Q = C\sqrt{2g} b h_e^{1,5}$$

- $C = 1,2$  le coefficient de débit ;
- $b$  la largeur du chenal ;
- $h_e$  la hauteur d'eau [m] mesurée en bout du chenal, au droit de la chute.

→ *Limites d'application de la formule :*

$b > 0,3$  m ;  $h_e > 0,04$  m ;  $L > 20h_e$  ;  $p > h$  (déversement libre de la lame d'eau).

→ **Attention :**

- la lame d'eau doit pouvoir se déverser complètement librement à l'aval et dans le cas d'une lame déversante confinée, la chute doit être suffisamment aérée pour qu'il règne sous celle-ci une pression égale à la pression atmosphérique ;
- à la différence du cas général (pour les déversoirs), **la hauteur d'eau  $h_e$  doit être mesurée au droit de la chute.**

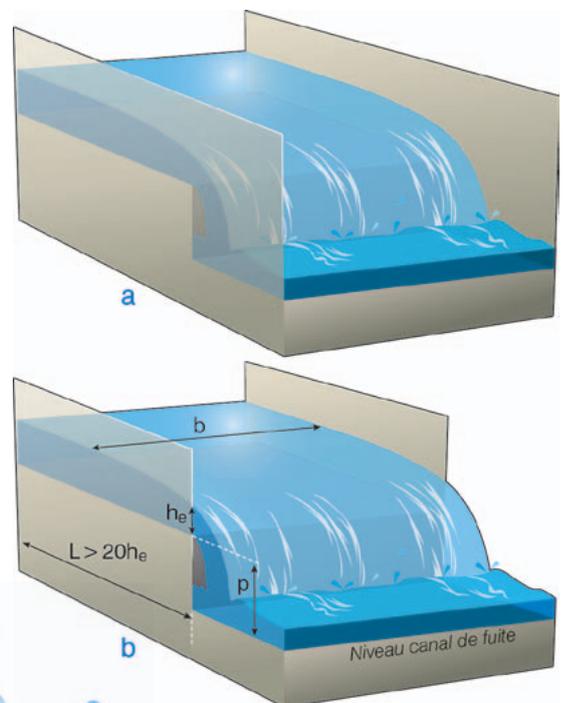


Fig. 8.5 - Déversoir rectangulaire sans pelle avec une lame déversante confinée (a) ou une lame déversante non confinée (b).



Fig. 8.6 - Délivrance d'un débit minimal par orifice calibré sur le Vicdessos (Ariège).

## 8.4 Formules pour orifices et pour vannes

### 8.4.1 Orifices en mince paroi

Un orifice [→ fig. 8.6] est une ouverture de forme régulière dans l'une des parois d'un réservoir, à travers laquelle s'écoule l'eau ; l'ouverture devant être complètement submergée à l'amont. La formule proposée peut être utilisée pour différentes formes d'orifices (circulaire, carrée, rectangulaire, etc.).

$$Q = C \sqrt{2g} S_o \Delta h^{0,5}$$

- $S_o$  est la surface de l'orifice [ $m^2$ ] ;
- $\Delta h$  une différence de hauteur à estimer suivant que l'orifice est dénoyé ( $\Delta h = h$  avec  $h$  : hauteur d'eau au dessus du centre de l'orifice [ $m$ ] [→ fig. 8.7a]) ou noyé ( $\Delta h = h_{am} - h_{av}$  avec  $h_{am}$ ,  $h_{av}$  : hauteurs du plan d'eau [ $m$ ] par rapport à un niveau de référence, prises respectivement à l'amont et à l'aval de l'orifice [→ fig. 8.7b]) ;

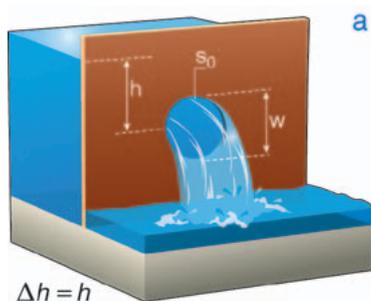
- $C$  un coefficient qui dépend de la contraction de la veine liquide :

- **pour les orifices complètement contractés**,  $C = 0,6$ . Un orifice est « complètement contracté » si son contour est entièrement en arête vive et s'il est suffisamment éloigné du lit et des parois latérales du chenal d'approche et de sortie. La distance du bord de l'orifice au lit et aux parois latérales ne doit pas être inférieure au rayon de l'orifice si celui-ci est circulaire et à deux fois la plus petite dimension si celui-ci a une autre forme (par exemple deux fois la largeur pour un orifice rectangulaire) ;

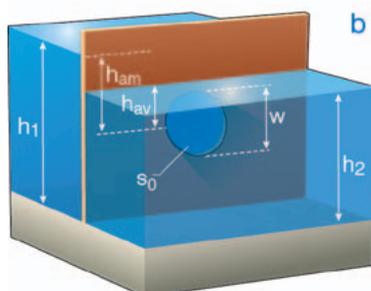
- **pour les orifices partiellement contractés**,  $C = 0,6 (1 + 0,15r)$ . Un orifice est « partiellement contracté » lorsque la contraction est supprimée sur une portion de son contour (par exemple, orifice s'appuyant sur le fond ou l'une des parois latérales du chenal d'approche).  $r$  est le rapport entre la portion de périmètre où la contraction est supprimée et le périmètre total.

→ *Limites d'application de la formule :*

- vitesse d'approche dans le chenal amont négligeable ;
- surface de la section mouillée à l'amont au moins égale à 10 fois la surface de l'orifice ( $S_{amont} \geq 10S_o$ ) ;
- différence de hauteur d'eau de part et d'autre de l'orifice au moins égale à 0,03 m ( $h_{am} - h_{av} = h_1 - h_2 \geq 0,03$  m) ;
- hauteur d'eau à l'amont au dessus de l'orifice supérieure au diamètre de l'orifice, soit  $h \geq 1,5w$  et  $w \geq 0,02$  m.



$$\Delta h = h$$



$$\Delta h = h_{am} - h_{av} = h_1 - h_2$$

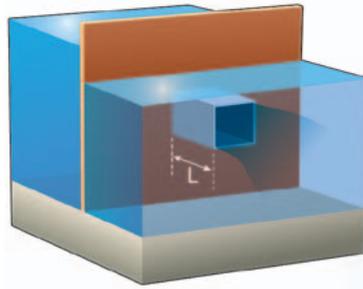
Fig. 8.7 - Orifice en mince paroi dénoyé à l'aval (a) ou noyé à l'aval (b)

### 8.4.2 Orifices avec ajutage

Le fait d'adapter un ajutage à un orifice modifie les contractions, ce qui a généralement pour effet une augmentation du coefficient de débit.

Lencastre (1986) suggère quelques valeurs types pour les coefficients de débit d'ajutages. Dans le cas d'**ajutages cylindriques dénoyés** de diamètre  $D_s$  et de longueur  $L$ , nous avons :

- si  $L \approx 0,5D_s$  et l'ajutage est dirigé face à l'écoulement :  $C \approx 0,51$  ;
- si  $2D_s \leq L \leq 3D_s$  et l'ajutage est dirigé face à l'écoulement :  $C \approx 0,75$  ;
- si  $2D_s \leq L \leq 3D_s$  et l'ajutage est dirigé dans le sens de l'écoulement :  $C \approx 0,82$ .



L/P	1	2	3	4	5
0,02	0,61	0,63	0,68	0,77	0,95
0,10	0,66	0,67	0,69	0,73	0,93
0,20	0,74	0,73	0,74	0,73	0,92
0,30	0,79	0,77	0,79	0,83	0,91
0,40	0,80	0,79	0,80	0,84	0,90
0,60	0,80	0,80	0,81	0,84	0,90
1,00	0,80	0,81	0,82	0,85	0,90

Dans le tableau 8.6 sont données à titre indicatif les valeurs du coefficient de débit  $C$  pour des **ajutages noyés à section carrée** dirigés dans le sens de l'écoulement (valables également pour des sections de forme un peu différente).  $C$  dépend du rapport  $L/P$  (où  $L$  est la longueur d'ajutage et  $P$  le périmètre de la section transversale de l'ajutage) et de la position de l'ajutage par rapport aux parois du chenal d'approche (position 1 à 5).

Tabl. 8.6 - Expression du coefficient de débit  $C$  pour plusieurs géométries d'ajutage (les zones jaunes représentent la portion de section transversale du chenal d'approche où la contraction est supprimée).

### 8.4.3 Vannes

Le même type de formule que pour les orifices peut être employé pour calculer le débit passant sous des vannes verticales installées en travers de chenaux rectangulaires (en prenant  $C = 0,6$  et  $S_0 = bw$  où  $b$  est la largeur de la vanne [m] et  $w$  la hauteur de l'ouverture de la vanne [m] [→ fig. 8.8]) :

$$Q = C \sqrt{2g} b w h^{0,5}$$

- $C = 0,60$  le coefficient de débit ;
- $b$  [m] la largeur de l'ouverture d'une vanne ;
- $w$  [m] la hauteur de l'ouverture d'une vanne ;
- $h$  [m] la hauteur d'eau à l'amont de la vanne mesurée à partir du radier de la vanne ;
- $h'$  la hauteur d'eau à l'aval de la vanne sous la contraction.

→ *Limites d'application de la formule :*

$h' < 0,6w$  (déversement libre à l'aval),  $h \geq 2w$ ,  $w \geq 0,02$  m, et  $h \geq 0,15$  m.

Il est aussi nécessaire que le fond soit plan et horizontal.

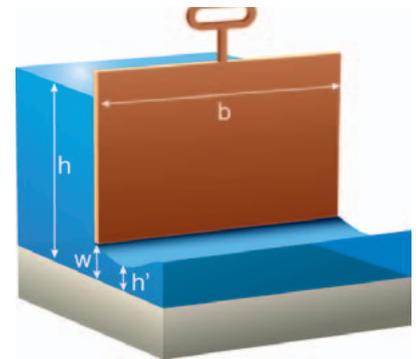


Fig. 8.8 - Schématisation d'une vanne.



## 8.5 Autres ouvrages et dispositifs

### 8.5.1 Départ de buse et dalot

Les écoulements dans les buses et dalots sont très complexes [→ fig. 8.9]. En effet, ces écoulements peuvent être en charge ou non, en régime sous-critique (fluvial) ou super-critique (torrentiel) ; la surface libre à l'intérieur de la buse ou dalot est de plus fonction des conditions amont et aval... À partir d'une

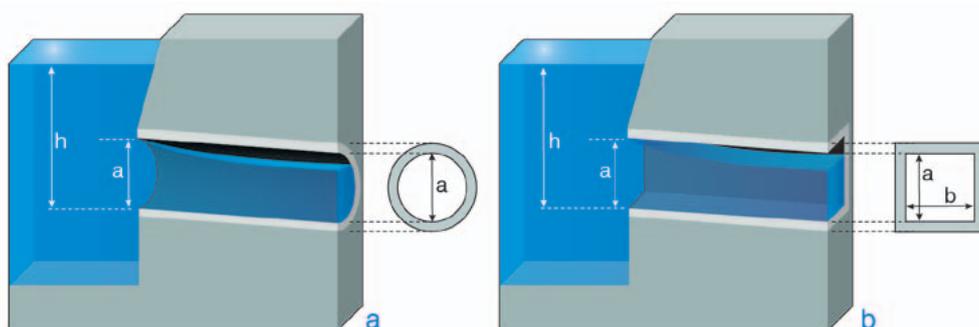


Fig. 8.9 - Schématisation d'une buse (a) et d'un dalot (b).

méthode détaillée développée par l'US Geological Survey, Chow (1973) a proposé des abaques donnant une solution approximative pour les départs de buses et dalots, valable lorsque la section de contrôle est en amont (passage en torrentiel dans le dalot ou la buse).

Ces abaques [→ fig. 8.10] permettent d'obtenir une valeur du débit à partir de la mesure de la hauteur d'eau  $h$  à l'amont du départ de buse (ou dalot) par rapport à la base de la buse (ou dalot) et du diamètre (ou de la hauteur) de la buse (ou dalot) notés  $a$ . Pour les dalots, il faut noter que l'abaque est proposé avec le rapport du débit  $Q$  sur la largeur du dalot  $b$ .

Selon l'état de la buse ou dalot et de la partie amont à l'ouvrage (possible ensablement, végétation, etc.), les incertitudes pour les départs de buse et dalot peuvent varier de 20 à 50 %.

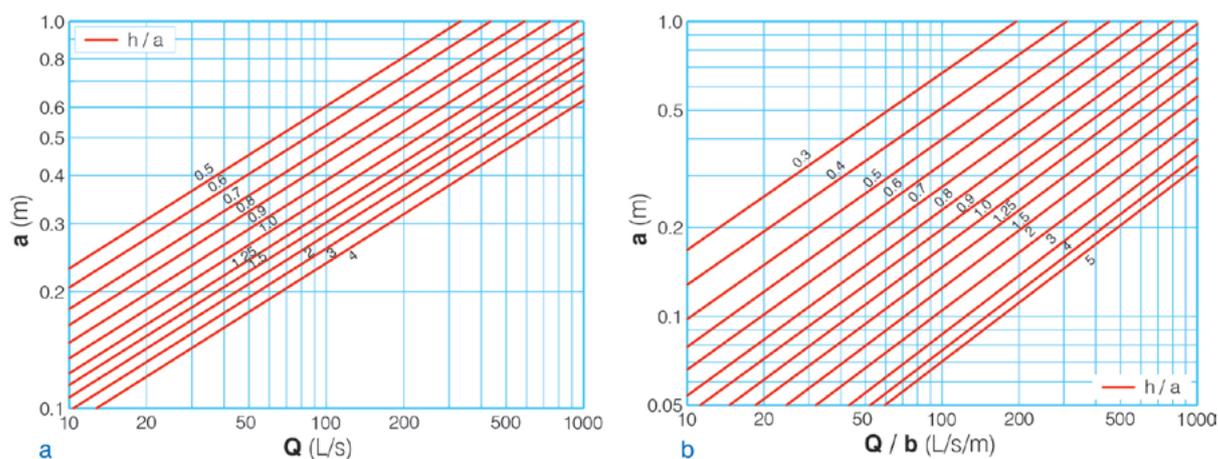


Fig. 8.10 - Abaque permettant l'estimation du débit d'une buse (a) et d'un dalot (b).

#### → Exemple 1

Soit une buse de diamètre  $a = 20$  cm, la hauteur d'eau mesurée au dessus de la buse est de  $h = 40$  cm, on a donc  $h/a = 2$  et on trouve à l'aide de l'abaque fig. 8.10a :  $Q \approx 45$  L/s

#### → Exemple 2

Soit un dalot de hauteur  $a = 20$  cm et de largeur  $b = 30$  cm, la hauteur d'eau mesurée au dessus de la buse est de  $h = 40$  cm, on a donc  $h/a = 2$  et on trouve à l'aide de l'abaque fig. 8.10b :  $Q \approx 200 \times 0,4 = 80$  L/s

## 8.5.2 Plaques jaugées

Pour les faibles débits, il est possible d'effectuer des mesures en installant momentanément en travers du cours d'eau une plaque jaugée (ou étalonnée) présentant un déversoir ou un orifice [→ fig. 8.2]. Prendre soin de bien étanchéifier le dispositif à sa base et sur ses côtés et attendre la stabilisation du niveau de l'eau avant d'effectuer la mesure. S'assurer à l'aide d'un niveau à bulle que la plaque est bien verticale, et que la crête du déversoir est bien horizontale. S'assurer également que le relèvement artificiel du plan d'eau ne provoque pas de dérivation d'une partie des eaux à l'amont.

## 8.5.3 Canaux jaugeurs

Les canaux jaugeurs sont des canaux profilés de manière à créer un passage de l'écoulement en régime critique par effet Venturi, et ainsi offrir une relation hauteur-débit stable, établie en usine par le constructeur<sup>4</sup>. Ces canaux doivent être horizontaux, et le point de mesure de hauteur d'eau (équipé d'une échelle graduée) est situé un peu en amont de la contraction latérale. Leur fond plat permettent une continuité du flux sédimentaire, donc une faible sensibilité à l'engrèvement. Perret (1992) donne quelques détails sur l'utilisation des canaux jaugeurs.

Des versions portatives, de dimensions réduites et équipées d'une bulle (afin de mettre le canal à niveau), peuvent être employées de la même manière que les plaques jaugées, avec les mêmes recommandations.

## 8.5.4 Stations hydrométriques

Certains règlements de la loi sur l'eau prévoient le contrôle en continu du débit maintenu en aval de la prise d'eau au moyen d'une station hydrométrique spécialement aménagée. Une station hydrométrique est une section de rivière aménagée ou non, où a été déterminée la relation entre le niveau de l'eau et le débit. La courbe de tarage  $Q = f(h)$  de la station est établie expérimentalement par calage sur un ensemble de jaugeages à différentes hauteurs d'eau (gamme jaugée). Dans le cas d'une station hydrométrique équipée d'un ouvrage étalonné, la loi de tarage théorique doit être vérifiée également par des jaugeages de contrôle.

Une station hydrométrique classique comporte :

- une échelle limnimétrique de référence (échelle graduée, implantée en berge) permettant de lire la cote du plan d'eau ;
- un limnigraphe (appareil enregistrant le niveau de l'eau en continu).

Certaines stations sont en outre équipées d'un dispositif de mesure des vitesses en continu : cordes à ultrasons (temps de transit), débitmètre Doppler, profileur Doppler horizontal HADCP, diffraction radar, analyse d'images, etc<sup>5</sup>.

Lorsque l'on veut connaître le débit au niveau d'une station hydrométrique, il suffit, d'une part, de relever la cote du plan d'eau par lecture sur l'échelle limnimétrique, et d'autre part, de se procurer auprès du service gestionnaire de la station soit la courbe de tarage, soit directement la valeur du débit correspondant à la cote lue. Il est important de vérifier que la date à laquelle a été lue la hauteur s'inscrit bien à l'intérieur de **la période de validité de la courbe de tarage** fournie (existence possible de courbes saisonnières, modification éventuelle de la courbe due à un réétalonnage de la station, à la végétation, etc.).



4 - En général, le débit  $Q$  est proportionnel à  $h^{1.5}$ .

5 - Les trois dernières techniques citées peuvent présenter des problèmes à basse vitesse (manque de particules en suspension pour les HADCP, influence du vent pour les mesures de surface).

L'incertitude associée à un débit issu d'une courbe de tarage bien jaugée sur une section naturelle est typiquement de l'ordre de 10 %, dans la gamme des hauteurs jaugées. Lorsque la hauteur lue est située à l'extérieur de la gamme des hauteurs jaugées et, en particulier, en dessous de la plus petite hauteur jaugée, les valeurs de débit obtenues par extrapolation de la courbe de tarage peuvent être assorties de bien plus grandes incertitudes. Il revient au gestionnaire de la station hydrométrique de juger quelle peut raisonnablement être la plage extrapolée en fonction du site et des informations disponibles. Les courbes de tarage établies pour des sections naturelles non aménagées (absence d'ouvrage tel qu'un seuil ou déversoir) présentent généralement de fortes incertitudes aux bas débits, en raison des changements morphologiques (détarage ou instabilité de la courbe de tarage) et d'un manque de sensibilité.

Les informations recueillies au niveau des stations de terrain (hauteurs d'eau, courbes de tarage, etc.) sont, pour la plupart, transmises et enregistrées sur la banque *Hydro*<sup>6</sup>. Dans le cas contraire, il faut directement s'adresser au producteur/gestionnaire de la station.

### 8.5.5 Passes à poissons

Une passe (ou échelle) à poissons est un ouvrage destiné à permettre aux poissons migrateurs de franchir un barrage ou un obstacle. Larinier et al. (1994) et Larinier et al. (2002) fournissent des éléments permettant d'évaluer le débit dans plusieurs types de passes à poissons.

Les relevés à effectuer pour les passes à poissons les plus communes sont les suivants :

- **passes à bassins** : géométrie de la passe (dimensions des échancrures, des fentes et orifices), cotes de déversement des échancrures ou des fentes, dénivellation entre cloisons successives, hauteurs d'eau amont et aval (mesurées à partir de la cote de déversement) ;
- **passes à ralentisseurs** : géométrie des ralentisseurs, cote du déversement (point le plus bas du déversoir), pente, hauteur d'eau amont (mesurée à partir de la cote du déversement).

Selon les conditions d'entretien et d'alimentation, les incertitudes pour une passe à poissons peuvent varier de 10 à 20 %.



Michel Larinier - Onema

Fig. 8.11 - Exemple de passe à poissons à ralentisseurs plans sur l'Ével (Morbihan).

6 - Banque nationale de données hydrométriques gérée par le ministère en charge de l'Écologie.

## 8.6 Calcul d'incertitude

### 8.6.1 Calcul détaillé

→ Se référer à la section 2.4 pour les notations et principes du calcul d'incertitude.

Pour chaque type d'ouvrage, on repart de la formule générale supposée pertinente, dont les différentes variables sont généralement considérées indépendantes. Ainsi, l'application de la méthode GUM (NF ENV 13005, 1999) de propagation des incertitudes donne pour les déversoirs et seuils :

$$Q = Cbh^n \rightarrow u'_{Q^2} = u'_C{}^2 + u'_b{}^2 + n^2u'_h{}^2$$

Dans le cas d'une vanne, on obtient de manière similaire :

$$Q = Cbw\sqrt{h} \rightarrow u'_{Q^2} = u'_C{}^2 + u'_b{}^2 + u'_w{}^2 + 1/4u'_h{}^2$$

L'incertitude élargie finale (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) dont il faut assortir la mesure de débit vaut :

$$U'_Q = 2 \times u'_Q \text{ (en \%)}$$

#### → Exemple d'un déversoir rectangulaire présent sur le terrain

Cet exemple correspond à la fiche terrain présentée ci-contre. En considérant le déversoir bien entretenu et avec de bonnes conditions hydrauliques d'approche, on peut donc appliquer la formule générale :

$$Q = A\sqrt{2g}b h^{1,5}$$

caractéristiques géométriques

$$b = 0,2 \text{ m} \quad B = 1,0 \text{ m}$$

$$h = 0,15 \text{ m} \quad p = 0,4 \text{ m}$$

calcul du débit :  $A = 0,40 \quad Q = 20 \text{ L/s}$

En réalité, la paroi de l'ouvrage n'est pas très mince ni biseautée. Par des essais numériques et des comparaisons avec les coefficients des seuils épais, on estime une incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) sur le coefficient de débit  $A$  à 10 %, soit  $u'A = 5 \%$ .

L'incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) sur la largeur  $b$  est estimée à 5 mm, soit 2,5 %. Ainsi,  $u'b = 1,25 \%$ .

L'incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) sur la hauteur d'eau  $h$  est estimée à 1 cm, soit 7 %. Ainsi,  $u'h = 3,5 \%$ .

L'incertitude-type combinée sur le débit est obtenue par :

$$u'_{Q^2} = 5^2 + 1,25^2 + 1,5^2 \times 3,5^2 = 54,1$$

à  $u'_Q = 7,4 \%$  environ.

Au final, on obtient une incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) sur le débit  $U'_Q = 15 \%$ .

On exprime le résultat comme suit :

$$Q = 20 \text{ L/s} \pm 3,0 \text{ L/s} \text{ (niveau de confiance à 95 \%, } k = 2)$$

Méthodes hydrauliques

Nom du cours d'eau : SURVERSE BASSIN Date : 05/04/2010  
 Heure UTC+2 début : 11:15 Heure UTC+2 fin : 11:45  
 Hauteur échelle début : 0,53 m Hauteur échelle fin : 0,53 m  
 Matériel de mesure : Mètre à ruban Classe II Opérateurs : BC, JLC  
 Niveau de chantier + règle aluminium

Croquis détaillé et côtes de l'ouvrage  
 Prendre le maximum de côtes sur l'ouvrage (hauteur de pelle, épaisseur du déversoir, dimensions)  
 Relever les hauteurs d'eau et indiquer les sur le croquis (en amont et en aval de l'ouvrage).  
 Préciser les unités m

Observations  
 l'eau un peu irrégulière  
 Vérification par empotement

N° Archivage : 6D-2010.H.008 Page 4.1.4

## 8.6.2 Estimation rapide

En pratique, pour les méthodes hydrauliques, la réitération n'est pas représentative de l'incertitude, car les erreurs systématiques l'emportent sur les erreurs aléatoires, la principale source d'incertitude étant liée au coefficient de débit et à la loi d'ouvrage appliqués à un ouvrage et écoulement réels et imparfaits.

L'amplitude de variation maximale  $eQ$  sur  $Q$  peut être estimée en considérant pour l'ouvrage utilisé la gamme de variation possible du coefficient de débit. Par précaution, on considère alors  $e_x = 2 (Q_{max} - Q_{min})$ , avec  $Q_{max}$  et  $Q_{min}$  les valeurs minimale et maximale de débit obtenues en faisant varier le coefficient de débit de façon réaliste. Il vient alors [→ explications Section 2.4.2.2] :

$$u'_Q = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{\sqrt{3} \text{ moyenne}(Q_i)}$$

Rappel : l'incertitude élargie finale (niveau de confiance à 95%,  $k=2$ ) dont il faut assortir la mesure de débit vaut :

$$U'_Q = 2 \times u'_Q \text{ (en \%)}$$

## 8.6.2 Valeurs usuelles

On retiendra les valeurs suivantes, usuellement rencontrées pour l'incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %,  $k = 2$ ) :

- sur un ouvrage étalonné et dédié à la mesure de débit, l'incertitude élargie  $U'_Q$  peut être aussi faible que 5 % ;
- dans les situations couramment rencontrées sur le terrain, l'incertitude peut atteindre 20 %, et même 40 % et plus dans le cas d'une loi de débit inadaptée à la réalité de l'ouvrage et de l'écoulement.

Dans le cas d'un contrôle, et dans les bonnes conditions d'application, on retiendra une valeur maximale de  $U'_Q = 20$  %, et  $U'_Q = 40$  % dans des conditions dégradées.

Les valeurs usuelles et limites de l'incertitude élargie  $U'_Q$  sont résumées dans le tableau comparatif Annexe B pour chaque méthode de jaugeage.





# Annexes



# Notations



## $\alpha\beta\gamma$

[sans dim. =  
sans dimension]

$\alpha$	[°]	demi angle au sommet de l'échancrure d'un déversoir en mince paroi
$\alpha_b$	[sans dim.]	coefficient de vitesse de bord ( $\alpha_b = V/v_{moy,vp}$ )
$\alpha_s$	[sans dim.]	coefficient de vitesse de surface ( $\alpha_s = v_{moy}/V_s$ )
$\Delta h$	[m]	différence de hauteur d'eau (orifices)
$\mu_X$	[unité de X]	moyenne expérimentale calculée à partir d'un échantillon de mesures de la grandeur X
$\sigma_X$	[unité de X]	écart-type expérimental corrigé calculé à partir d'un échantillon de mesures de la grandeur X

## **a**

$a$	[m]	hauteur de l'ouverture d'un seuil à lame mince, hauteur à l'amont au dessus d'un orifice, hauteur d'une buse ou dalot
$a_h$	[m]	pas hydraulique d'une hélice
$A_1$	[sans dim.]	coefficient permettant de calculer le coefficient de débit C pour un seuil épais de profil rectangulaire
$A_2$	[sans dim.]	coefficient permettant de calculer le coefficient de débit C pour un seuil épais de profil trapézoïdal
$A_3$	[sans dim.]	coefficient permettant de calculer le coefficient de débit C pour un seuil épais de profil triangulaire

## **b**

$b$	[m]	largeur de la crête d'un déversoir ou d'un seuil
$b_h$	[m/s]	vitesse dite de frottement ou vitesse de démarrage d'une hélice
$b_i$	[m]	largeur d'une sous-section de débit (dans la méthode d'intégration par section médiane)
$B$	[m]	largeur du chenal d'écoulement

## **c**

$c$	[m <sup>1/2</sup> /s]	coefficient local (proportionnel au coefficient de Chézy) appliqué pour la méthode utilisant un nombre réduit de verticales (flotteurs) : $c = v_{moy}/\sqrt{h}$
$c_{moy}$	[m <sup>1/2</sup> /s]	valeur moyenne sur l'écoulement du coefficient c appliqué pour la méthode utilisant un nombre réduit de verticales (flotteurs)
$C$	[sans dim.]	coefficient de débit des lois de tarage des ouvrages hydrauliques
$C_c$	[sans dim.]	coefficient de débit pour un déversoir circulaire en mince paroi
$C_h$	[m <sup>1/2</sup> /s]	coefficient de frottement de Chézy
$C_r$	[sans dim.]	coefficient de débit pour un déversoir rectangulaire en mince paroi
$C'_1$	[sans dim.]	coefficient de débit pour les déversoirs rectangulaire en mince paroi
$C'_2$	[sans dim.]	coefficient de débit pour les déversoirs triangulaire en mince paroi

$C_0$	[g/L]	concentration de base des eaux en traceur (méthode par dilution)
$C_1$	[g/L]	concentration en traceur de la solution injectée (méthode par dilution)
$C_2$	[g/L]	concentration en traceur mesurée au point aval (méthode par dilution)
$C_{2m}$	[g/L]	concentration en traceur au point aval moyenne sur le temps de passage (méthode par dilution)
$C_{2opt}$	[g/L]	valeur objectif de $C_{2m}$ (méthode par dilution)

**d**

$d$	[sans dim.]	densité des éléments utilisés comme flotteurs
$D$	[sans dim.]	facteur de dilution ( $D = C_1/C_{2m}$ , méthode par dilution)
$D'$	[sans dim.]	facteur de dilution estimé ( $D' = Q' T_c/Vol_1$ , méthode par dilution)
$D_c$	[m]	diamètre d'une conduite fermée (méthode par dilution)
$D_i$	[sans dim.]	facteur de dilution de solutions étalons (méthode par dilution)
$D_s$	[m]	diamètre d'un déversoir circulaire (ouvrages hydrauliques)
$DC_n$	[m <sup>3</sup> /s]	Nième valeur de débit, lorsque l'on range les débits journaliers d'une année dans l'ordre décroissant
$DCN_n$	[m <sup>3</sup> /s]	Nième valeur de débit, lorsque l'on range les débits journaliers d'une année dans l'ordre croissant

**e**

$e$	[m]	épaisseur de la crête d'un seuil ou d'un déversoir
$e_b$	[m]	épaisseur de la base d'un seuil
$e_x$	[unité de X]	écart maximal de la grandeur X à la valeur moyenne

**g**

$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	accélération de la pesanteur (gravité, $g = 9,81$ m/s <sup>2</sup> )
-----	---------------------	--

**h**

$h$	[m]	tirant d'eau (profondeur locale de l'écoulement) ; hauteur d'eau mesurée à l'amont d'un ouvrage hydraulique ; hauteur d'eau (lame d'eau) mesurée au dessus de la crête d'un seuil ou déversoir à une distance vers l'amont d'environ $3h$
$H$	[m]	charge hydraulique ( $H = h + v_{moy}^2/(2g)$ )
$h_{chute}$	[m]	hauteur de chute (différence entre le niveau de la crête d'un ouvrage (seuil ou déversoir) et le niveau de la surface libre à l'aval). $h_{chute} = h_{am} - h - h_{av} = p - h_{av}$ .
$h_{am} (h_1)$	[m]	hauteur d'eau mesurée à l'amont d'un ouvrage
$h_{av} (h_2)$	[m]	hauteur d'eau mesurée à l'aval d'un ouvrage
$h_i$	[m]	profondeur d'une sous-section de débit (dans la méthode d'intégration par section médiane)

**i**

$i$	[sans dim.]	indice, n° de verticale
$i_{am}$	[sans dim.]	pente amont d'un seuil épais triangulaire ou trapézoïdal
$i_{av}$	[sans dim.]	pente aval d'un seuil épais triangulaire ou trapézoïdal

**k**

$k$	[sans dim.]	coefficient d'élargissement du calcul d'incertitude
$k_1$	[sans dim.]	coefficient correcteur représentant l'erreur sur un débit jaugé par dilution due à un mélange imparfait ; $k_1$ est proche de 1 dans les bonnes conditions d'application





$k_2$	[sans dim.]	coefficient correcteur représentant l'erreur sur un débit jaugé par dilution due à une perte, dégradation ou apport de traceur ; $k_2$ est proche de 1 dans les bonnes conditions d'application
$k_f$	[sans dim.]	coefficient de fond (dépouillement des jaugeages par exploration des vitesses)
$k_r$	[sans dim.]	coefficient de rive (dépouillement des jaugeages par exploration des vitesses)
$K$	[sans dim.]	coefficient adimensionnel intervenant dans la formule de Rimmar (méthode par dilution)
<b>l</b>		
$L$	[m]	distance moyenne parcourue par l'eau pendant le temps $T$
$L_{bm}$	[m]	longueur de bon mélange (méthode par dilution)
$L_r$	[m]	distance entre la rive et la verticale de mesure adjacente
<b>m</b>		
$m$	[sans dim.]	nombre de verticales d'un jaugeage par exploration des vitesses
$M$	[kg]	masse de traceur injectée au point l
<b>n</b>		
$n$	[sans dim.]	nombre, occurrences ; exposant des lois de tarage des ouvrages hydrauliques
$n_t$	[sans dim.]	nombre de tours d'hélice par seconde
<b>p</b>		
$p$	[m]	hauteur de pelle (ouvrages hydrauliques)
<b>q</b>		
$q_i$	[m <sup>2</sup> /s]	débit partiel calculé sur une sous-section de débit (dans la méthode d'intégration par section médiane, $q_i = v_{moy} \times S_i$ )
$Q$	[m <sup>3</sup> /s]	débit d'eau
$Q'$	[m <sup>3</sup> /s]	débit estimé avant mesure (méthode par dilution)
$Q_i$	[m <sup>3</sup> /s]	débit jaugé lors d'une série de $n$ jaugeages successifs
$Q_{mesuré}$	[m <sup>3</sup> /s]	débit réellement mesuré (hors extrapolations de bords, fond et surface) lors d'un jaugeage par profileur Doppler ADCP
$Q_M$	[m <sup>3</sup> /s]	module (interannuel) d'un cours d'eau
$Q_{MA,i}$	[m <sup>3</sup> /s]	débit moyen annuel d'un cours d'eau (pour l'année $i$ )
$Q_{M,s}$	[L/s/km <sup>2</sup> ]	module (interannuel) spécifique d'un cours d'eau (= $Q_M/S_b$ )
$Q_{total}$	[m <sup>3</sup> /s]	débit total (somme du débit mesuré $Q_{mesuré}$ et des débits extrapolés aux bords, fond et surface) lors d'un jaugeage par profileur Doppler ADCP
$QCN_n$	[m <sup>3</sup> /s]	minimum annuel des débits (instantanés) maximums sur le pas de temps choisi de $n$ jours
$QJNA$	[m <sup>3</sup> /s]	minimum annuel des débits journaliers
$QME$	[m <sup>3</sup> /s]	débit du mois d'étiage
$QMNA$	[m <sup>3</sup> /s]	minimum annuel des débits mensuels
<b>r</b>		
$r$	[sans dim.]	pour un orifice, rapport entre la portion de périmètre où la contraction est supprimée et le périmètre total

**S**

$s$	[m]	largeur de la crête d'un seuil épais trapézoïdal
$S_i$	[m <sup>2</sup> ]	surface d'une sous-section de débit (dans la méthode d'intégration par section médiane, $S_i = b_i \times h_i$ )
$S$	[m <sup>2</sup> ]	surface de la section mouillée
$S_b$	[km <sup>2</sup> ]	superficie d'un bassin versant
$S_o$	[m <sup>2</sup> ]	surface d'un orifice (ouvrages hydrauliques)
$S_r$	[m <sup>2</sup> ]	surface mouillée entre la rive et la verticale de mesure adjacente

**t**

$T$	[s]	durée d'une mesure, temps de passage du traceur (méthode par dilution)
$T_c$	[s]	durée entre l'injection du colorant et la disparition totale du colorant au niveau de la section de prélèvement (méthode par dilution)
$T_p$	[s]	durée entre l'apparition et la disparition du colorant au niveau de la section de prélèvement (méthode par dilution)

**U**

$u_x$	[unité de X]	incertitude-type associée à la mesure d'une grandeur X
$u'_x$	[%]	incertitude-type relative (%) associée à la mesure d'une grandeur X ( $u'_x = u_x/X$ )
$U_x$	[unité de X]	incertitude-type élargie ( $= ku_x$ ) associée à la mesure d'une grandeur X
$U'_x$	[%]	incertitude-type élargie relative ( $= ku'_x$ ) associée à la mesure d'une grandeur X ( $U'_x = U_x/X$ )

**V**

$v$	[m/s]	vitesse locale du courant (au point de mesure)
$v_f$	[m/s]	vitesse au fond de l'écoulement, estimée à l'aide d'un coefficient de fond $k_f$
$v_m$	[m/s]	vitesse moyenne obtenue sur un aller-retour de la perche intégratrice
$v_{moy}$	[m/s]	vitesse du courant moyenne sur la verticale de mesure
$v_{pf}$	[m/s]	vitesse mesurée avec le courantomètre en butée basse près du fond
$v_x$	[m/s]	vitesse mesurée à la hauteur $x \times h$ mesurée à partir du fond, avec $h$ le tirant d'eau
$v_s$	[m/s]	vitesse à la surface de l'écoulement
$V_m$	[m/s]	vitesse moyenne de l'écoulement sur la section de mesure
$V_i$	[m/s]	vitesse moyenne sur la sous-section de jaugeage
$VCN_n$	[m <sup>3</sup> /s]	minimum annuel des débits moyens sur le pas de temps choisi de $n$ jours
$Vol$	[m <sup>3</sup> ]	volume d'eau
$Vol_1$	[m <sup>3</sup> ]	volume de la solution injectée (méthode par dilution)

**W**

$w$	[ms]	hauteur de l'ouverture d'une vanne, hauteur (diamètre) d'un orifice
-----	------	---

**X**

$x$	[sans dim.]	position relative du courantomètre depuis le fond (le courantomètre est positionné à la hauteur $x \times h$ au-dessus du fond)
$x_{pf}$	[sans dim.]	position relative du courantomètre en butée basse près du fond (le courantomètre est positionné à la hauteur $x_{pf} \times h$ au-dessus du fond)
$x_s$	[sans dim.]	position relative du courantomètre sous la surface (le courantomètre est positionné à la hauteur $x_s \times h$ au-dessus du fond)



## Tableau comparatif des différentes méthodes



Le tableau B.1 ci-dessous regroupe quelques informations chiffrées relatives aux divers procédés de mesure décrits dans ce guide et peut contribuer au choix de la méthode à utiliser. Il faut cependant signaler que les valeurs mentionnées ne représentent que **des ordres de grandeur correspondant à des situations moyennes**. Elles sont donc essentiellement indicatives et peuvent se révéler sensiblement différentes dans les cas particuliers rencontrés en pratique sur le terrain.

Tabl. B.1 - Comparaison des méthodes de contrôle des débits.

	Méthode par capacité	Exploration du champ des vitesses (déploiement à pied)			Méthode par dilution	Méthode hydraulique
		Courantomètre	Profileur	Flotteur		
Nombre minimal d'opérateurs <sup>1</sup>	2	2	2	2	2	1
Durée de mise en œuvre sur le terrain [min]	15	60	30	30	60	10
Durée de dépouillement des mesures [min]	5	30	15	20	30	10
Degré de technicité	★	★★	★★★	★★	★★★	★★
Gamme de débit mesurable [m <sup>3</sup> /s]	0 → 0,02	0,01 → 100	0,2 → 100	0,01 → 100	0,01 → 100	0,01 → 1000
Incertitude relative [%]	5 - 10	7 - 15	5 - 10	10 - 50	3 - 10	5 - 40
Ordre de grandeur de l'investissement [€]	100	10 000	30 000	200	5 000	100

<sup>1</sup> - Pour des raisons de sécurité, il est recommandé que les missions de terrain soient effectuées par au moins deux agents.



# Glossaire

## A

**Amont** : ce qui vient avant le point considéré, dans le sens de l'écoulement.

**Aval** : ce qui vient après le point considéré, dans le sens de l'écoulement.

## B

**Bajoyer** : paroi latérale d'un chenal.

**Bassin versant** : surface considérée à partir d'un exutoire (point de sortie des eaux, point aval), limitée par le périmètre à l'intérieur duquel se rassemblent les eaux précipitées qui s'écoulent en surface et en souterrain vers cet exutoire. L'aire de collecte des eaux superficielles correspond au bassin versant topographique, celle des eaux souterraines, au bassin versant hydrogéologique et la réunion des deux correspond au bassin versant réel. La ligne de partage des eaux (superficielles et/ou souterraines) constitue la limite entre bassins versants voisins.

**Bief** : tronçon de chenal entre deux sections transversales définies.

## C

**Charge** : hauteur utile (exprimée en mètre) entre un point amont et un point aval qui va déterminer l'énergie réelle à fournir pour passer de l'état aval à l'état amont, soit de la somme de la hauteur de la lame déversante  $h$  (énergie potentielle) et du terme  $v_{moy}^2/(2g)$  (énergie cinétique).

**Chenal** : surface longitudinale comprenant le lit et les rives dans lesquels l'écoulement à surface libre se produit. Un lit peut comporter plusieurs chenaux.

**Conductimètre** : appareil de mesure de la conductivité électrique d'un écoulement (méthode par dilution chimique).

**Courantomètre** : appareil de mesure de la vitesse en un point de l'écoulement. Le principe de mesure d'un courantomètre peut être mécanique (« moulinets »), électro-magnétique ou acoustique Doppler (ADV, ADC). Pour le jaugeage à pied, il est généralement déployé sur une perche graduée sur des verticales réparties sur la section de mesure (méthode par exploration du champ des vitesses).

**Courbe de tarage** : relation entre le niveau d'eau et le débit étalonnée avec des jaugeages au niveau d'une station hydrométrique.

**Cours d'eau phréatique** : cours d'eau dont la source et les éventuels apports intermédiaires sont directement et uniquement liés au niveau de la nappe phréatique.

**Cours d'eau karstique** : Cours d'eau traversant des terrains fissurés en général calcaires et pouvant subir des pertes ou bénéficier d'apports dus à des résurgences.

**Crête, seuil** : ligne ou surface définissant le sommet d'un déversoir.

## D

**Débitmètre** : appareil de mesure fixe permettant de mesurer directement la section mouillée (à travers un niveau d'eau et une bathymétrie) et la vitesse débitante (à travers une vitesse caractéristique de l'écoulement). Le principe de mesure de vitesse peut être électromagnétique (« manchettes »), acoustique Doppler, acoustique à temps de transit, etc.

## E

**Écoulement** : mouvement d'un volume d'eau transitant dans un chenal.

**Écoulement à surface libre** : écoulement dont la surface est en contact avec l'atmosphère (opposé à écoulement en conduite forcée, ou encore écoulement en charge).

**Écoulement permanent** : écoulement dont les caractéristiques (débit, hauteur d'eau, vitesse) ne varient pas au cours du temps.

**Écoulement uniforme** : écoulement dont les caractéristiques (débit, hauteur d'eau, vitesse) ne varient pas d'une section à l'autre.

## F

**Fleur d'eau** (à) : terme utilisé pour définir le point topographique correspondant à la surface de l'eau au niveau de l'une ou l'autre berge.

**Fluorimètre** : appareil servant au dosage par fluorimétrie (méthode par dilution).

## H

**Hydraulique** : discipline scientifique qui se rapporte à l'écoulement de l'eau (ou éventuellement d'autres liquides) dans les chenaux naturels ou artificiels, les conduites, ou à travers des ouvrages quelconques.

**Hydrologie** : discipline scientifique qui se rapporte à l'eau, au cycle de l'eau et par extension, technique d'évaluation et de gestion des ressources en eau.

**Hydrométrie** : méthodologie et technologie de la mesure des hauteurs d'eau et des débits dans les cours d'eau.

## J

**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.

## L

**Largeur au miroir** : distance rectiligne comprise entre les deux points de fleur d'eau, en rive droite et rive gauche.

## P

**Pelle** (hauteur de pelle) : hauteur entre le lit et le point le plus bas de la crête d'un déversoir, mesurée en amont de celui-ci.

**Profileur de courant** : appareil de mesure de profils de vitesse le long d'une verticale de mesure, par effet Doppler acoustique (ADCP).

## R

**Radier** : partie inférieure de la section d'un chenal (par exemple, fond d'un canal, partie bétonnée au fond de la rivière sous un pont, etc.).

**Régime critique** : état de l'écoulement dans lequel l'énergie totale est minimale pour un débit déterminé (correspond à la limite entre régime torrentiel et régime fluvial).

**Régime fluvial** (subcritique) : état de l'écoulement pour lequel une perturbation à la surface de l'eau peut se propager vers l'amont (correspond à un écoulement à faible vitesse et forte hauteur d'eau).

**Régime torrentiel** (supercritique) : état de l'écoulement pour lequel une perturbation à la surface de l'eau ne peut pas se propager vers l'amont (correspond à un écoulement à forte vitesse et faible hauteur d'eau).

**Rive gauche/droite** : rive située à gauche/droite pour un observateur regardant vers l'aval.

## S

**Section** (ou aire) **mouillée** : section transversale limitée par la surface du plan d'eau et la ligne du fond. Aire correspondante.

**Section transversale** : section d'un cours d'eau perpendiculaire à la direction principale du courant.

## T

**Tirant d'eau** : hauteur d'eau à partir du point le plus bas de la section transversale d'un chenal. Distance entre le fond et la surface de l'eau.

# Bibliographie sélective

## 1 Métrologie

- [1] ISO/CEI GUIDE 99 (2007), *Vocabulaire international de métrologie - Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*, ISO, 108 p.
- [2] NF EN ISO 772 (2001), *Déterminations hydrométriques - Vocabulaire et symboles*, ISO, 110 p.
- [3] NF ENV 13005 (1999), *Guide pour l'expression des incertitudes de mesure*, ISO, 120 p. 17, 20, 27, 51, 53, 62, 72, 83, 98
- [4] ISO/TR 8363 (1997), *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts - Lignes directrices générales pour la sélection de la méthode*, ISO, 10 p.

## 2 Hydraulique et hydrologie générales

- [5] Folton, N., et Lavabre, J. (2007), *Approche par modélisation pluie-débit pour la connaissance régionale de la ressource en eau : application à la moitié du territoire français*, La Houille Blanche, 03-200, 64-70. 9
- [6] Graf W., et M. Altinakar (2009), *Hydraulique fluviale : Écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple*, Traité de génie civil de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR), 628 p.

## 3 Hydrométrie

- [7] Aldegheri M. (1979), *Manuel d'hydrométrie, tome IV : mesure des débits à partir des vitesses*, Éditions ORSTOM, 313 p. 68
- [8] André H., Audinet M., Mazeran, G., et Richer, C. (1976), *Hydrométrie pratique des cours d'eau*, Direction des études et recherches d'Électricité de France (EDF), Éditions Eyrolles, 259 p. 79, 80
- [9] Bertrand-Krajewski, J.-L., Laplace, D., Joannis, C., et Chebbo, G. (2000), *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*, Éditions Tec&Doc, 794 p. 80
- [10] Boiten W. (2000), *Hydrometry*, Francis and Taylor publishers, 242 p. 79, 80
- [11] Forray N. et al. (1998), *Charte qualité de l'hydrométrie*, Code de bonnes pratiques, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 55 p.
- [12] Jaccon G. (1986), *Manuel d'hydrométrie, tome V : tracé de la courbe de tarage et calcul des débits*, Éditions ORSTOM, 225 p.

[13] Rantz S.E. (1982), *Measurement and computation of streamflow : Volume 1, Measurement of stage and discharge*, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2175, 284 p.

[14] Rantz S.E. (1982), *Measurement and computation of streamflow : Volume 2, Computation of discharge*, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2175, 347 p.

## 4 Méthodes par exploration du champ des vitesses

[15] NF EN ISO 748 (2007), *Hydrométrie - Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de moulinets ou de flotteurs*, ISO, 50 p. 33, 39, 40, 42, 43, 44, 47, 49, 51, 52, 53, 62, 66, 72, 73

[16] ISO 3455 (2007), *Hydrométrie - Étalonnage des moulinets en bassins découverts rectilignes*, ISO, 20 p. 30, 34, 35, 36

[17] NF ISO 2537 (1989), *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts - Moulinets à élément rotatif*, ISO, 8 p.

[18] ISO/TR 9823 (1990), *Mesurage de débit des liquides dans les canaux découverts - Méthode d'exploration du champ des vitesses utilisant un nombre réduit de verticales*, ISO, 9 p. 65, 66, 67, 70

[19] Herschy, R.W. (2002), *The uncertainty in a current meter measurement*. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13, 281–284. 51, 52

[20] Perret, C. (1992), *Les moulinets. Étalonnage, comportement, entretien*. Note technique D4160/DTG-RE/92-MOU02/R1-A, 60 p et annexes. 32, 96

## 5 Profileurs acoustiques Doppler (ADCP)

[21] ISO/TS 24154 (2005), *Hydrometry - Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers*, ISO, 10 p.

[22] Le Coz, J., Pierrefeu, G., Saysset, G., Brochot, J.-F., Marchand, P. (2008), *Mesures hydrologiques par profileurs Doppler (aDcp)*, Éditions QUAE, 155 p. 55, 57, 60

## 6 Méthode par dilution

[23] NF ISO 9555-1 (1994), *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts - Méthodes de dilution en régime permanent utilisant des traceurs - Partie 1 : généralités*, ISO, 56 p.

[24] NF ISO 9555-2 (1994), *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts - Méthodes de dilution en régime permanent utilisant des traceurs - Partie 2 : traceurs radioactifs*, ISO, 20 p.

[25] NF ISO 9555-3 (1994), *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts - Méthodes de dilution en régime permanent utilisant des traceurs - Partie 3 : traceurs chimique*, ISO, 20 p.

[26] NF ISO 9555-4 (1994), *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts - Méthodes de dilution en régime permanent utilisant des traceurs - Partie 4 : traceurs fluorescents*, ISO, 16 p.



## 7 Méthodes hydrauliques (ouvrages)

[27] NF X10-314 (1983), *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de déversoirs et de canaux jaugeurs - Méthode d'évaluation du débit par détermination de la profondeur en bout des chenaux rectangulaires à déversement dénoyé*, 12 p (similaire à la norme ISO 3847, 1977). 85

[28] NF X10-315 (1990), *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de déversoirs et de canaux jaugeurs - Déversoirs rectangulaires à seuils épais*, 12 p (similaire à la norme ISO 3846, 1989). 85, 89, 90

[29] ISO 1438 (2008), *Hydrométrie - Mesure de débit dans les canaux découverts au moyen de déversoirs à paroi mince*, ISO, 66 p (similaire à la norme NF X10-311, 1983). 85

[30] Chow V.T. (1973), *Open channel hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, 680 p. (en anglais). 95

[31] Laborie V., et Ladreyt S.(2005), *Notice sur les déversoirs - Synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et déversoirs*, Centre d'études techniques maritimes et fluviales, 87 p. 88

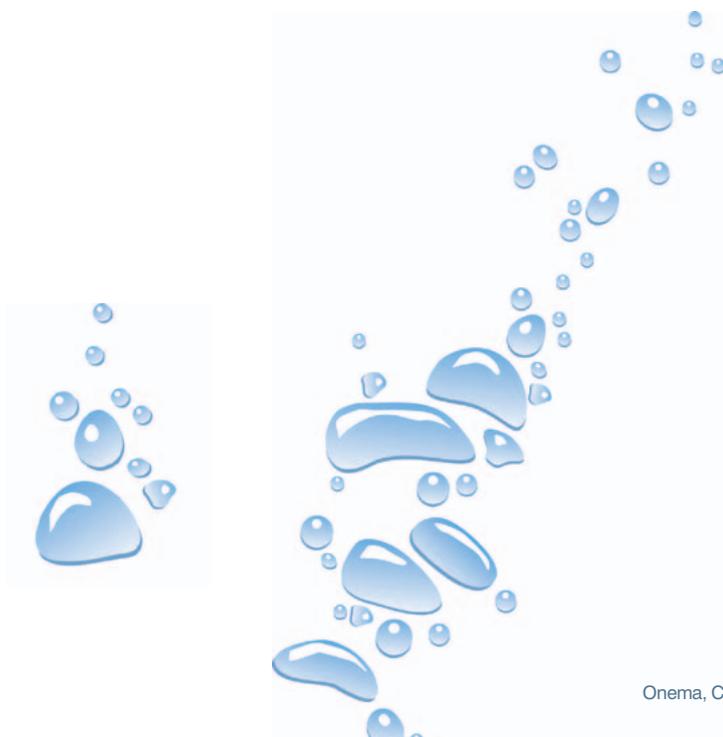
[32] Larinier M. (1983), *Guide pour la conception des dispositifs de franchissement des barrages pour les poissons migrateurs*, Bulletin français de pisciculture, Éditions Conseil supérieur de la pêche.

[33] Larinier M., Travade F., Porcher J.P., Gosset C., 1994, *Passes à poissons : expertise, conception des ouvrages de franchissement*, Collection Mise au point, Éditions Conseil supérieur de la pêche, 336 p. 97

[34] Larinier M., Travade F., Porcher J.P., 2002, *Fishways : biological basis, design criteria and monitoring*, Bull. Fr. Pêche et de la Pisc., 364, 1-208 (en anglais). 97

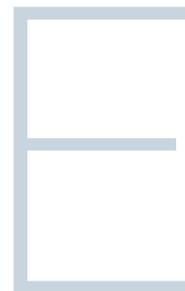
[35] Lencastre A. (1986), *Manuel d'hydraulique générale*, Collection de la direction des études et recherches d'Électricité de France, Éditions Eyrolles, 411 p. 89, 90, 93

[36] Pister B., Cambon J.P., Laveuf L., Peyrelade G., 1987. *Débitmétrie : dispositifs jaugeurs*, La Houille Blanche, 4/5, 323-331.





## Modèles de fiches de terrain pour le relevé des observations et des mesures



■ Jaugeage par capacité.....	116
■ Jaugeage par exploration du champ des vitesses au moulinet ( $R^\circ$ et $V^\circ$ ).....	117
■ Jaugeage par exploration du champ des vitesses au courantomètre ( $R^\circ$ et $V^\circ$ ).....	119
■ Jaugeage par exploration du champ des vitesses au moulinet (5 points) ( $R^\circ$ et $V^\circ$ ).....	121
■ Jaugeage par exploration du champ des vitesses au courantomètre (5 points) ( $R^\circ$ et $V^\circ$ ).....	123
■ Jaugeage par exploration du champ des vitesses à l'aide d'un profileur de courant.....	125
■ Jaugeage par la méthode des flotteurs.....	126
■ Jaugeage par traçage avec une solution saline.....	127
■ Méthodes hydrauliques.....	128



### Jaugeage par capacité

Nom du cours d'eau :	Date : / /
Heure UTC début :	Heure UTC fin :
Hauteur échelle début :	Hauteur échelle fin :
Matériel de mesure :	
Volume du récipient :	
Opérateurs :	

Heure	Volume (L)	Temps de remplissage (s)	Débit (L/s)	Observations
Moyenne des débits				
Ecart type				
Ecart type / Moyenne				
Heure	Volume (L)	Temps de remplissage (s)	Débit (L/s)	Observations
Moyenne des débits				
Ecart type				
Ecart type / Moyenne				
N° Archivage :				

### Jaugeage par exploration du champ des vitesses au moulinet

Nom du cours d'eau :	Date : / /
Heure UTC début :	Heure UTC fin :
Hauteur échelle début : m	Hauteur échelle fin : m
Largeur de la section : m	
Origine de la mesure RD <input type="checkbox"/> RG <input type="checkbox"/>	
Abscisse d'origine : cm	Abscisse de fin : cm
Profondeur rive d'origine : cm	Profondeur rive de fin : cm
Matériel de mesure :	N° Hélice / Diamètre : /
Opérateurs :	Moyenne :

N° Verticale	Distance à la rive (cm)	Profondeur (cm)	Position du capteur (cm)	Vitesse (m/s)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

**Observations / Variations de hauteur pendant le jaugeage**

N° Archivage :

Page .../...

### Jaugeage par exploration du champ des vitesses au moulinet

Nom du cours d'eau :

Date : / /

N° Verticale	Distance à la rive (cm)	Profondeur (cm)	Position du capteur (cm)	Vitesse (m/s)
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

**Observations / Variations de hauteur pendant le jaugeage**

N° Archivage :

Page .../...

### Jaugeage par exploration du champ des vitesses au courantomètre

Nom du cours d'eau :	Date : / /
Heure UTC début :	Heure UTC fin :
Hauteur échelle début : m	Hauteur échelle fin : m
Largeur de la section : m	
Origine de la mesure RD <input type="checkbox"/> RG <input type="checkbox"/>	
Abscisse d'origine : cm	
Profondeur rive d'origine : cm	Profondeur rive de fin : cm
Matériel de mesure :	
Opérateurs :	Moyenne :

N° Verticale	Distance à la rive (cm)	Profondeur (cm)	Position du capteur (cm)	Vitesse (m/s)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

**Observations / Variations de hauteur pendant le jaugeage**

N° Archivage :

Page .../...

### Jaugeage par exploration du champ des vitesses au courantomètre

Nom du cours d'eau :

Date : / /

N° Verticale	Distance à la rive (cm)	Profondeur (cm)	Position du capteur (cm)	Vitesse (m/s)
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

**Observations / Variations de hauteur pendant le jaugeage**

N° Archivage :

Page .../...

Jaugeage par exploration du champ des vitesses au moulinet (5 points)				
Nom du cours d'eau :		Date : / /		
Heure UTC début :		Heure UTC fin :		
Hauteur échelle début : m		Hauteur échelle fin : m		
Largeur de la section : m				
Origine de la mesure RD <input type="checkbox"/> RG <input type="checkbox"/>				
Abscisse d'origine : cm		Abscisse de fin : cm		
Profondeur rive d'origine : cm		Profondeur rive de fin : cm		
Matériel de mesure :		N° Hélice / Diamètre : /		
Opérateurs :		Moyenne :		
N° Verticale	Distance à la rive (cm)	Profondeur (cm)	Position du capteur (cm)	Vitesse (m/s)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
N° Archivage :			Page .../...	

### Jaugeage par exploration du champ des vitesses au moulinet (5points)

Nom du cours d'eau :

Date : / /

N° Verticale	Distance à la rive (cm)	Profondeur (cm)	Position du capteur (cm)	Vitesse (m/s)
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				

**Observations / Variations de hauteur pendant le jaugeage**

N° Archivage :

Page .../...

### Jaugeage par exploration du champ des vitesses au courantomètre (5 points)

Nom du cours d'eau : \_\_\_\_\_ Date : / /

Heure UTC début : \_\_\_\_\_ Heure UTC fin : \_\_\_\_\_

Hauteur échelle début : \_\_\_\_\_ m Hauteur échelle fin : \_\_\_\_\_ m

Largeur de la section : \_\_\_\_\_ m

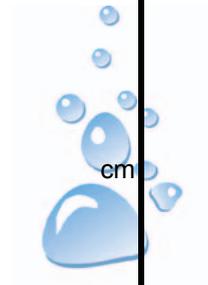
Origine de la mesure RD  RG

Abscisse d'origine : \_\_\_\_\_ cm

Profondeur rive d'origine : \_\_\_\_\_ cm Profondeur rive de fin : \_\_\_\_\_ cm

Matériel de mesure : \_\_\_\_\_

Opérateurs : \_\_\_\_\_ Moyenne : \_\_\_\_\_



N° Verticale	Distance à la rive (cm)	Profondeur (cm)	Position du capteur (cm)	Vitesse (m/s)
1				
2				
3				
4				
5				
6				

N° Archivage : \_\_\_\_\_

Page .../...

**Jaugeage par exploration du champ des vitesses au courantomètre (5 points)**

Nom du cours d'eau :

Date :    /    /

N° Verticale	Distance à la rive (cm)	Profondeur (cm)	Position du capteur (cm)	Vitesse (m/s)
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				

**Observations / Variations de hauteur pendant le jaugeage**

N° Archivage :

Page .../...



**Jaugeage par la méthode des flotteurs**

Nom du cours d'eau : \_\_\_\_\_ Date : / /  
 Heure UTC début : \_\_\_\_\_ Heure UTC fin : \_\_\_\_\_  
 Hauteur échelle début : \_\_\_\_\_ m Hauteur échelle fin : \_\_\_\_\_ m  
 Type de flotteurs utilisés : \_\_\_\_\_  
 Distance entre les sections amont et aval : \_\_\_\_\_ m

**Croquis détaillé et côtes de la section de mesure amont (AB)**

(Largeur, abscisse et profondeur des différentes verticales réparties sur la section)

Origine des abscisses RD  RG  **Préciser les unités**

**Croquis détaillé et côtes de la section de mesure aval (CD)**

(Largeur, abscisse et profondeur des différentes verticales réparties sur la section)

N° de verticale	Distance à la rive	Temps de passage AB à CD	Vitesse	Observations

N° Archivage :

Page .../...



Jaugeage par traçage avec une solution saline				
Nom du cours d'eau :		Date : / /		
Heure UTC début :		Heure UTC fin :		
Hauteur échelle début :		Hauteur échelle fin :		
Type d'injection :	Traceur :			
Distance d'injection : m	Masse de traceur :		g	
	Conductivité de la solution injectée :		μS/cm	
	Volume de la solution injectée :		mL	
	Conductivité de l'eau de la rivière en mouvement :		μS/cm	
	Conductivité de l'eau de la rivière au repos :		μS/cm	
Matériel de mesure :				
Etalonnage sur site :		oui	non	
Solution étalon standard :		oui	non	gamme étalon de terrain : oui non
Opérateurs :				
Observations :				
Gamme étalon de terrain				
Concentration en sel			Conductivité	
Injection N°	Nom de fichier	Temps d'injection	Temps de début de passage du traceur	Temps de fin de passage du traceur
N° Archivage :				Page .../...

**Méthodes hydrauliques**

Nom du cours d'eau :	Date : / /
Heure UTC début :	Heure UTC fin :
Hauteur échelle début : m	Hauteur échelle fin : m
Matériel de mesure :	Opérateurs :

**Croquis détaillé et côtes de l'ouvrage**

Prendre le maximum de côtes sur l'ouvrage (hauteur de pelle, épaisseur du déversoir, dimensions)  
Relever les hauteurs d'eau et indiquer les sur le croquis (en amont et en aval de l'ouvrage).

**Préciser les unités**

Observations

N° Archivage :

Page .../...