



**HAL**  
open science

# Méthode généralisée pour le calcul de l'incertitude sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses

Jérôme Le Coz, X. Peyrard, B. Camenen, Guillaume Dramais

► **To cite this version:**

Jérôme Le Coz, X. Peyrard, B. Camenen, Guillaume Dramais. Méthode généralisée pour le calcul de l'incertitude sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses. [Rapport Technique] irstea. 2011, pp.32. hal-02596843

**HAL Id: hal-02596843**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02596843>**

Submitted on 15 May 2020

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

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

# Méthode généralisée pour le calcul de l'incertitude sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses

J. Le Coz, X. Peyrard, B. Camenen, G. Dramais

Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique

Cemagref, 3 bis quai Chauveau CP 220, 69336 LYON cedex 09, FRANCE

Tel. +33 (0)4 72 20 86 07 ; Fax +33 (0)4 78 47 78 75

Courriel: [jerome.lecoz@cemagref.fr](mailto:jerome.lecoz@cemagref.fr)

Version du 18 août 2011

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Position du problème</b>	<b>2</b>
1.1	Jaugeages par exploration du champ des vitesses . . . . .	2
1.2	Etat de l'art sur l'analyse d'incertitude des jaugeages par extrapolation du champ des vitesses . . . . .	4
1.3	Objectifs pour une méthode généralisée . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Méthodes proposées pour quantifier l'incertitude due aux procédures d'intégration</b>	<b>9</b>
2.1	Intégration verticale de la vitesse . . . . .	9
2.2	Intégration transversale de la profondeur . . . . .	12
2.3	Intégration transversale de la vitesse et extrapolation de rives . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Comparaison des deux méthodes sur des exemples d'application</b>	<b>17</b>
3.1	Présentation des exemples d'application . . . . .	17
3.2	Comparaison des résultats des deux méthodes . . . . .	23
3.3	Incetitude associée à la distribution des verticales . . . . .	25
3.4	Incetitude associée à la mesure et l'intégration verticale de la vitesse . . . . .	26

# Chapitre 1

## Position du problème

$\hat{i}$   
 $\hat{j}$   
 $\vec{i}$   
 $\vec{j}$

### 1.1 Jaugeages par exploration du champ des vitesses

Le débit des cours d'eau naturels et artificiels est un paramètre clé pour les études hydrologiques et les décisions politiques concernant les ressources en eau, l'habitat biologique et les risques naturels. Comme tout autre type de mesures, les mesures de débit ne sont pas complètes si l'incertitude associée, généralement exprimée comme la demi-largeur d'un intervalle de confiance à 95%, n'est pas fournie avec la valeur centrale. Sans une estimation de l'incertitude sur le débit, l'utilisateur des données n'est pas en mesure d'évaluer les erreurs potentiellement induites, par exemple, dans les coûts associés aux dommages dus aux inondations, dans le constat d'une infraction aux réglementations sur l'eau, ou dans l'évaluation de la précision d'un modèle hydrologique.

Le débit instantané ou quasi-instantané d'un cours d'eau peut être mesuré en utilisant diverses techniques (voir par exemple Herschy, 1999; Rantz, 1982), dont la plupart nécessite une quantité coûteuse de travail sur le terrain. Pour la plupart des stations hydrométriques, la série temporelle de débit en continu est obtenue à partir de l'enregistrement du niveau

d'eau et d'une relation hauteur-débit étalonnée à l'aide d'un jeu de mesures de débit instantané, ou "jaugeages". La technique la plus populaire est l'exploration du champ des vitesses, qui se compose essentiellement d'une somme discrète de la vitesse d'écoulement normale sur la section du canal. Les vitesses et les profondeurs d'eau sont échantillonnées sur des positions verticales données distribuées sur toute la section. Pour une verticale donnée  $j$ , les valeurs mesurées de la position  $y_j$  depuis la rive de départ, de la profondeur d'eau  $d_j$ , et de la vitesse ponctuelle perpendiculaire à la section  $v_{j,k}$  mesurée à la profondeur  $d_{j,k}$ , sont écrites avec des lettres minuscules. Alors que les distances sont mesurées en utilisant des dispositifs classiques étalonnés, les vitesses ponctuelles sont mesurées avec des courantomètres, soit mécaniques (hélices), soit électro-magnétiques (effet Hall), soit acoustiques (effet Doppler), qui sont généralement montés sur une perche graduée, ou déployés à partir d'un téléphérique ou à partir d'un pont.

Pour calculer le débit total  $Q$  dans la section divisée en  $m$  sous-sections  $i$ , l'intégration discrète est réalisée comme suit :

$$Q = \sum_{i=1}^m Q_i = \sum_{i=1}^m B_i D_i V_i \quad (1.1)$$

avec  $Q_i$ ,  $B_i$ ,  $D_i$ , et  $V_i$ , respectivement le débit partiel, la largeur, la profondeur moyenne, et la vitesse moyenne de chaque sous-section  $i$ . Les lettres majuscules indiquent que ce sont des valeurs calculées associées à l'intégration des sous-sections, et non les valeurs mesurées. Les techniques d'intégration les plus utilisées sont les méthodes de la section médiane<sup>1</sup> et de la section moyenne<sup>2</sup>, qui produisent des résultats égaux en aire mouillée et similaires en débit (moins de 1% typiquement).

Selon la méthode de la section médiane, une sous-section est un rectangle centré sur la verticale de mesure et s'étendant jusqu'à la demi-distance des verticales voisines. La profondeur et la vitesse moyenne affectées à la sous-section sont la profondeur et la vitesse moyenne mesurées à la verticale considérée. Selon la méthode de la section moyenne, une sous-section est le trapèze délimité par deux verticales successives, et la vitesse moyenne affectée à cette sous-section est la moyenne des vitesses mesurées sur chaque verticale.

---

1. mid-section, méthode des rectangles  
2. mean-section, méthode des trapèzes

Dans les deux méthodes, à chaque verticale  $j$ , la vitesse moyenne sur la profondeur  $\bar{v}_j$  est calculée soit comme une somme pondérée de vitesses ponctuelles mesurées à des hauteurs normalisées au-dessus du lit<sup>3</sup> soit directement par interpolation linéaire<sup>4</sup>. En plus de ces deux méthodes, la méthode par intégration<sup>5</sup> est plus rarement utilisée : la vitesse est alors physiquement intégrée lors d'un ou plusieurs cycles de descente et de remontée du courantomètre sur la majeure partie de la profondeur. Pour cette dernière méthode comme pour la méthode de distribution des vitesses, les vitesses doivent être extrapolées jusqu'au lit (débit de fond) et jusqu'à la surface libre (débit de surface), en supposant que la distribution verticale de la vitesse suit une fonction de puissance, linéaire ou une évolution constante. Comme pour les vitesses de fond et de surface, la vitesse moyenne dans la sous-section délimitée par la première / dernière verticale et la rive correspondante doit également être extrapolée en utilisant un coefficient déduit d'une fonction puissance (loi de la paroi).

## 1.2 Etat de l'art sur l'analyse d'incertitude des jaugeages par extrapolation du champ des vitesses

L'identification et l'estimation des erreurs sur les jaugeages par extrapolation du champ des vitesses a été abordée par plusieurs auteurs (voir par exemple, Carter and Anderson, 2000; Rantz, 1982; Pelletier, 1988; Sauer, 1992). A partir d'une large revue de la littérature générale (plus de 140 publications), Pelletier (1988) a classé les incertitudes selon les sources d'erreur suivantes : l'échantillonnage de l'aire de la section transversale, l'échantillonnage de la vitesse moyenne dans le temps, l'échantillonnage de la vitesse moyenne dans l'espace (à la fois verticalement et transversalement), les erreurs du courantomètre (en considérant différents effets), et les différences dans la procédure de calcul du débit. Les incertitudes liées à des extrapolations de vitesse haut / bas / bords ne sont pas prises en compte.

Cependant, ces examens et ces estimations des erreurs ne fournissent pas un cadre pour effectuer l'analyse d'incertitude selon des normes métrologiques. Le cadre le plus classique-

---

3. *Méthodes utilisant un nombre réduit de points* (NF EN ISO 748, 2009)

4. *Méthode de distribution des vitesses* (NF EN ISO 748, 2009)

5. *Méthode d'intégration* (NF EN ISO 748, 2009)

ment suivi pour l'évaluation de l'incertitude sur les jaugeages par extrapolation du champ des vitesses demeure la méthode présentée dans la norme NF EN ISO 748 (2009). Herschy (2002) montre que cette méthode, initialement affectée par des problèmes de terminologie, est conforme au cadre de l'analyse d'incertitude du GUM (NF ENV 13005, 1999). N.B. Toutes les composantes d'incertitude écrites  $u(X)$  dans ce document sont des incertitudes-types relatives (en % du mesurande  $X$ ). Comme il est fait habituellement, l'incertitude finale  $U$  est exprimée en utilisant un facteur d'élargissement  $k = 2$  (correspondant à un niveau de confiance de 95%). Suivant un développement limité au premier ordre, l'équation pour l'incertitude combinée du débit mesuré  $u(Q)$  proposée par la norme ISO 748 s'écrit ainsi :

$$u^2(Q) = u_s^2 + u_m^2 + \frac{\sum Q_i^2 \left[ u^2(B_i) + u^2(D_i) + u_p^2(V_i) + \frac{1}{n_i} [u_c^2(V_i) + u_e^2(V_i)] \right]}{(\sum Q_i)^2} \quad (1.2)$$

avec les composantes d'incertitude suivantes :

- $u_s$  provenant des erreurs systématiques résiduelles sur l'étalonnage des instruments de mesure des vitesses, des largeurs et des profondeurs
- $u_m$  provenant des erreurs dues au nombre limité  $m$  de verticales (intégration transversale des profondeurs et des vitesses)
- $u_p(V_i)$  provenant des erreurs dues au nombre limité  $n_i$  de mesures de vitesse ponctuelles sur la verticale  $i$  (intégration verticale de la vitesse)
- $u(B_i)$ ,  $u(D_i)$ ,  $u_c(V_i)$ ,  $u_e(V_i)$ , provenant des erreurs aléatoires sur, respectivement, les mesures de largeur et de profondeur, et sur les mesures de vitesse ponctuelle à cause des limites du courantmètre et de la moyenne temporelle des fluctuations turbulentes sur le temps d'exposition

Pour un nombre suffisant de verticales ( $m \geq 10$ ) et un nombre constant  $n$  de mesures de vitesse par verticale, si les débits partiels  $Q_i$  sont à peu près égaux, et en supposant que les composantes d'incertitude sont aussi à peu près égales sur les verticales, alors l'équation peut être simplifiée comme suit :

$$u^2(Q) = u_s^2 + u_m^2 + \frac{1}{m} \left[ u^2(B) + u^2(D) + u_p^2(V) + \frac{1}{n} [u_c^2(V) + u_e^2(V)] \right] \quad (1.3)$$

En supposant qu'un étalonnage correct des instruments est atteint, des valeurs typiques sont proposés par Herschy (2002) et NF EN ISO 748 (2009) :  $u_s = 1\%$ ,  $u(B) = u(D) = 0.5\%$ . La norme NF EN ISO 748 (2009) (Annexe E) fournit également des valeurs informatives pour  $u_m$  (en fonction du nombre de verticales  $m$ ),  $u_p$  (en fonction de la méthode d'intégration verticale des vitesses et du nombre de points de vitesse),  $u_c$  (en fonction de la vitesse mesurée et du type d'étalonnage du courantomètre),  $u_e$  (en fonction de la vitesse mesurée, du temps d'exposition et de la position sur la verticale). Pour des raisons pratiques, dans cette étude les valeurs informatives de la norme ISO 748 pour les composantes d'incertitude  $u_m$ ,  $u_p$ ,  $u_c$ , et  $u_e$  sont interpolées en utilisant des fonctions puissance calées, comme par exemple :

$$u_m = 32m^{-0.88} \quad (1.4)$$

### 1.3 Objectifs pour une méthode généralisée

Bien que le cadre d'analyse d'incertitude proposée par la norme NF EN ISO 748 (2009) soit une méthode de référence solide, son application à la diversité des jaugeages par extrapolation du champ des vitesses produits par les équipes d'hydrométrie est problématique. Cette méthode d'analyse d'incertitude convient aux jaugeages "canoniques", soit des mesures de débit qui respectent toutes les exigences de la norme ISO 748, pour lesquelles l'incertitude estimée n'est que rarement supérieure à 5% ou 7%. Cependant, pour un certain nombre de jaugeages non-canoniques, elle produit des valeurs d'incertitude qui apparaissent souvent incohérentes avec les connaissances d'expert ou les données de vérification.

Plus précisément, les inconvénients suivants de la méthode d'analyse d'incertitude de la norme ISO 748 peuvent être identifiées :

1. Parce que les valeurs informatives données par l'annexe E pour les composantes d'incertitude sont tirées d'études empiriques, elles sont spécifiques d'un type d'instrument et de certaines conditions de mesure. Malgré cela, ces valeurs sont souvent appliquées hors de leur domaine de validité, en l'absence d'autre solution pratique.

2. Les extrapolations de vitesse haut / bas / bords ne sont pas prises en compte dans l'analyse de l'incertitude. Et pourtant, elles peuvent induire des erreurs importantes sur le débit total quand leur contribution n'est pas négligeable.
3. Lorsque l'intégration verticale de la vitesse est réalisée directement (interpolation linéaire), une valeur négligeable (0,5%) est attribuée par défaut à  $u_p$ . La norme exige que la différence de vitesse entre deux points de mesure adjacents sur la verticale doit être inférieure à 20% de la plus grande des deux mesures. En pratique, cela signifie un grand nombre de points de vitesse et une description à haute résolution du profil de vitesse près du lit. Pour les mesures non-canoniques avec un nombre insuffisant de points de vitesse et des extrapolations haut / bas souvent significatives, la valeur de  $u_p$  devrait être estimée supérieure à 0,5%.
4. La plupart de l'incertitude calculée provient généralement du terme  $u_m$  associé au nombre  $m$  de verticales. Sa valeur est une fonction empirique de  $m$  seulement, sans aucune considération de la répartition des verticales à travers la section et de la situation rencontrée (distribution latérale de la géométrie et des débits). Là encore, les mesures de débit canoniques sont censées avoir des débits partiels  $Q_i$  plus petits que 5-10% du débit total (ce qui implique  $m > 10 - 20$ ). Un autre problème est que  $u_m$  englobe les erreurs d'intégration latérale de profondeur comme de vitesse, bien que ces deux sources d'erreur aient un poids potentiellement différent puisque la variation latérale de vitesse est généralement plus lisse que la variation latérale de géométrie du lit.
5. L'erreur d'intégration temporelle en cas de débit variable lors de la mesure n'est pas estimée. En plus des limites d'efficacité (déploiement des équipes) et d'intrusion des instruments, en pratique cette erreur limite souvent le nombre de verticales et de points de vitesse qu'il est raisonnable de mesurer. Pour la plupart des mesures en crue, cette incertitude doit être estimée, ainsi que l'écart de débit à la courbe de tarage lié aux effets d'écoulement transitoire (hystérésis).

Pour toutes ces raisons, il apparaît nécessaire de proposer une approche plus générale pour le calcul de l'incertitude associée aux jaugeages par extrapolation du champ des vitesses. Ce document présente des propositions pour résoudre les limitations de la méthodologie

de la norme ISO 748 mentionnées ci-dessus. De nouveaux protocoles simples pour le calcul de l'incertitude liée à l'intégration verticale de la vitesse et à l'intégration latérale de la vitesse et de la profondeur sont détaillées. Ensuite, la nouvelle méthode d'analyse des incertitudes est appliquée à un jeu de jaugeages contrastés, et les résultats sont discutés et comparés avec les résultats obtenus suivant la norme ISO 748.

# Chapitre 2

## Méthodes proposées pour quantifier l'incertitude due aux procédures d'intégration

### 2.1 Intégration verticale de la vitesse

Les valeurs d'incertitude fournies par la norme ISO 748 pour les formules algébriques à 1-2-3-5-6 points s'appuient sur des études expérimentales détaillées. Par conséquent, aucun changement dans l'estimation de ces valeurs n'est proposé. On doit se rappeler que ces valeurs sont valables pour des écoulements usuels 2D uniformes avec le profil vertical logarithmique associé à la couche limite turbulente complètement développée. En outre, ces valeurs ne sont pertinentes que lorsque les formules algébriques sont appliquées à la vitesse mesurée aux positions normalisées. Elles ne doivent pas être utilisées lorsque l'intégration verticale directe d'un nombre limité de vitesses ponctuelles est effectuée. En particulier, leur applicabilité aux mesures ADCP stationnaire, comme proposé par SonTek/YSI (2007), n'est pas justifiée.

En raison des limitations de la norme ISO 748 mentionnées ci-dessus, une nouvelle approche est proposée pour estimer l'incertitude liée à l'intégration directe de la vitesse verticale basée sur une interpolation linéaire et les options d'extrapolation dans les couches haut / bas. L'incertitude  $u_p(\bar{v}_j)$  sur la vitesse moyenne sur la profondeur  $\bar{v}_j$  sur une ver-

ticale  $j$ , due à la procédure d'intégration verticale, est plus facilement calculée comme étant égale à l'incertitude d'intégration verticale  $u_p(q_j)$  du débit par unité de largeur  $q_j$  ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ), aussi appelé "potentiel unitaire". Les erreurs dues à la procédure de calcul du débit interpolé (ou "mesuré") et du débit extrapolé (haut / bas) sont considérées comme indépendantes, même si certaines mesures de vitesse sont utilisées pour les deux opérations. En effet, l'interpolation et l'extrapolation des débits unitaires sont deux "mesures" de natures différentes, puisque l'extrapolation nécessite l'hypothèse d'une distribution de vitesse verticale basée sur des considérations théoriques ou empiriques. Ainsi, l'incertitude sur le débit unitaire due à la procédure d'intégration verticale s'écrit simplement :

$$u_p^2(q_j) = u_{p,meas}^2(q_j) + u_{p,top/bot}^2(q_j) \quad (2.1)$$

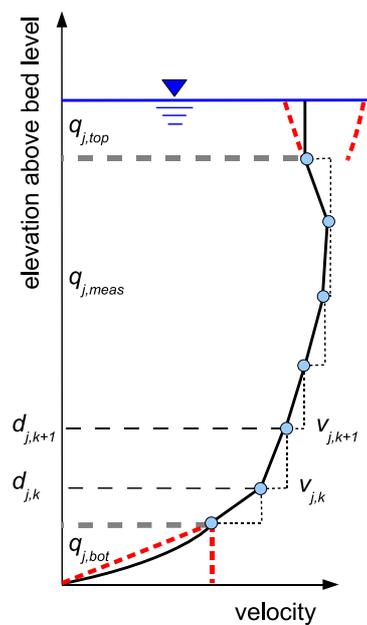


FIGURE 2.1 – Principe du calcul de l'erreur maximale sur la vitesse moyenne sur la verticale due à l'échantillonnage discret des vitesses et à l'extrapolation de la vitesse dans les couches haute et basse.

Pour évaluer l'incertitude due à l'interpolation,  $u_{p,meas}(q_j)$ , l'erreur maximale de débit entre les points adjacents  $k$  et  $k + 1$  est estimée comme  $\Delta q_{j,meas} = |(v_{j,k} - v_{j,k+1})(d_{j,k} - d_{j,k+1})|/2$  (voir Fig. 2.1). Cette estimation est basée sur l'hypothèse d'une distribution de vitesse vraie régulière et située entre l'interpolation linéaire et le maximum de  $v_{j,k}$  et  $v_{j,k+1}$ .

Par conséquent, en supposant une fonction de densité de probabilité rectangulaire pour les erreurs d'interpolation, de l'incertitude sur le débit mesuré est calculée comme suit (NF ENV 13005, 1999) :

$$u_{p,meas}^2(q_j) = \frac{1}{12q_j^2} \sum [(v_{j,k} - v_{j,k+1})(d_{j,k} - d_{j,k+1})]^2 \quad (2.2)$$

De même, l'incertitude due à l'extrapolation  $u_{p,top/bot}(q_j)$  est évaluée en fonction des erreurs de débit maximales dans les couches supérieures et inférieures (top/bottom), en supposant une fonction de densité de probabilité rectangulaire pour les erreurs d'extrapolation (NF ENV 13005, 1999) :

$$u_{p,top/bot}(q_j) = \frac{\Delta q_{j,top} + \Delta q_{j,bot}}{2\sqrt{3}q_j} \quad (2.3)$$

L'erreur maximale de débit de surface (top),  $\Delta q_{j,top}$ , est estimée à partir de l'écart maximal entre les différentes options d'extrapolation par rapport à l'extrapolation constante prise comme référence. Les options fournissant les plus grandes et potentiellement les plus faibles estimations de débit de surface sont utilisées, respectivement : ajustement puissance d'exposant  $1/m_b$  avec  $m_B = 2$  (cas du lit le plus rugueux possible) et ajustement linéaire sur les deux points les plus hauts. L'erreur maximale de débit haut est prise comme deux fois l'écart maximal à l'extrapolation constante, parce que dans le pire des cas le profil de vitesse peut aussi bien diminuer qu'augmenter jusqu'à la surface libre :  $\Delta q_{j,top} = 2 \max(|q_{j,top}^{lin} - q_{j,top}^{cst}|, |q_{j,top}^{m_b=2} - q_{j,top}^{cst}|)$ .

L'erreur maximale de débit de fond (bottom) est simplement calculé comme  $\Delta q_{j,bot} = q_{j,bot}/2$ , puisque les pires des cas sont supposés être un profil de vitesse linéaire à zéro au niveau de lit, et un profil de vitesse constante.

Comme souhaité, cette formulation de  $u_p(q_j)$ , ou de façon équivalente  $u_p(\bar{v}_j)$ , donne des valeurs d'incertitude cohérentes avec les valeurs fournies par l'ISO 748 standard. Typiquement, pour des mesures de vitesse conformes aux exigences de la norme ISO 748 pour l'intégration verticale directe, la méthode d'estimation fournit des valeurs d'incertitude  $u_p(\bar{v}_j) \approx 0,5\%$  ou légèrement supérieures. Dans le cas de l'intégration directe de vitesse effectuée avec un nombre très limité de points (1-2-3), les valeurs calculées de l'incertitude  $u_p(\bar{v}_j)$  sont supérieures aux valeurs informatives de la norme ISO 748 pour les formules algébriques correspondantes. Ceci est cohérent avec les grandes incertitudes résultant des

débits extrapolés et interpolés, à cause de l'échantillonnage à basse résolution du profil vertical, alors que la base physique des formules algébriques permet de réduire l'incertitude.

Le cas de la méthode par intégration n'est pas traité explicitement par la norme ISO 748. En l'absence d'études spécifiques sur les incertitudes de cette méthode, nous proposons de considérer que l'incertitude due à l'intégration verticale est négligeable dans la partie mesurée du profil, grâce à l'intégration physique. Dans ce cas,  $u_p(\bar{v}_j)$  ne découle que des incertitudes sur les débits extrapolés, surtout en bas. Cependant, le nombre de mesures de vitesse indépendantes,  $n_j$ , est égal au nombre de cycles complets du courantomètre sur la verticale  $j$ . Puisque  $n_j$  est habituellement égal à 1 ou 2, et puisque le temps d'exposition varie habituellement de 30 à 100 secondes, la contribution de l'incertitude du courantomètre à l'incertitude finale est aussi élevée que dans le cas de mesures à 1 ou 2 points.

Dans le cas de la méthode de calcul de la section médiane,  $u_p(V_i) = u_p(\bar{v}_j)$ , puisque la vitesse moyenne sur la profondeur  $\bar{v}_j$  à la verticale  $j$  est appliquée à la sous-section environnante. Dans le cas de la méthode de calcul de la section moyenne,  $u_p(V_i) = 1/2\sqrt{u_p^2(\bar{v}_j) + u_p^2(\bar{v}_{j+1})}$ , puisque la moyenne de  $\bar{v}_j$  et  $\bar{v}_{j+1}$  est appliquée à la sous-section délimitée par les verticales  $j$  et  $j + 1$ .

## 2.2 Intégration transversale de la profondeur

Une nouvelle méthode est proposée pour estimer l'incertitude due aux erreurs d'intégration transversale des profondeurs et des vitesses moyennes sur la profondeur. Au lieu d'un seul terme  $u_m$  (NF EN ISO 748, 2009), les incertitudes d'intégration transversale sur la profondeur,  $u_m(D_i)$ , et sur la vitesse,  $u_m(V_i)$ , affectées à chaque sous-section, sont calculées. Cela conduit à l'équation suivante, modifiée à partir de Eq.1.2 :

$$u^2(Q) = u_s^2 + \frac{\sum Q_i^2 \left[ u^2(B_i) + u^2(D_i) + u_p^2(V_i) + u_m^2(D_i) + u_m^2(V_i) + \frac{1}{n_i} [u_c^2(V_i) + u_e^2(V_i)] \right]}{(\sum Q_i)^2} \quad (2.4)$$

Pour évaluer  $u_m(D_i)$ , l'erreur maximale de profondeur  $\Delta D_i$  due à l'intégration transversale, ou de façon équivalente l'erreur maximale sur l'aire de la sous-section  $S_i = B_i D_i$ , est estimée en utilisant les données du jaugeage. En supposant une fonction de den-

sité de probabilité rectangulaire pour les erreurs d'intégration (NF ENV 13005, 1999),  $u_m(D_i) = \Delta D_i / (2\sqrt{3})$ .

Des approches similaires ont été étudiées récemment par d'autres auteurs, comme par exemple, Kiang et al. (2009); Olivier et al. (2009), la différence fondamentale avec la présente approche reposant dans la façon dont est estimée  $\Delta D_i$ . Kiang et al. (2009) et Olivier et al. (2009) ont introduit des méthodes appliquées à la procédure de la section médiane. La première méthode estime  $\Delta D_i$  à partir de l'écart de  $D_i$  à l'interpolation linéaire de  $D_{i-1}$  et  $D_{i+1}$ . La seconde méthode stipule que  $\Delta D_i = |D_{i-1} - D_{i+1}|$ . Une généralisation possible de la dernière méthode est de poser  $\Delta D_i = |D_{i-1} - D_i| + |D_i - D_{i+1}|$ . Kiang et al. (2009) suggèrent de calculer l'incertitude de vitesse  $u_m(V_i)$  de la même manière que  $u_m(D_i)$ , alors que Olivier et al. (2009) suppose que  $u_m(D_i)$  est représentatif des deux sources d'erreur à la fois.

Plusieurs problèmes peuvent survenir avec ces techniques. Dans certains cas où les profondeurs mesurées montrent une évolution presque linéaire ou constante, les deux méthodes peuvent gravement sous-estimer l'incertitude sur la profondeur, puisque l'estimation de  $\Delta D_i$  est petite alors que le niveau du lit peut varier considérablement entre les verticales. En outre, pour la même raison, il se peut qu'un espacement plus grand entre les verticales n'augmente pas directement les incertitudes calculées. Enfin, la prise en compte d'informations déjà connues sur les profils de bathymétrie / vitesse n'est pas directement possible.

e Pour s'attaquer à ces inconvénients, tout en gardant une procédure simple, nous proposons d'estimer  $\Delta D_i$  à partir d'estimations réalistes des aires de sous-section max / min calculées à partir d'hypothèses physiquement justifiées sur la géométrie de la section en travers. La façon la plus simple consiste à fixer une valeur définie par l'utilisateur  $\alpha$  représentant la pente transversale du fond maximale, en incluant les irrégularités du fond comme des mouilles ou des blocs par exemple. La valeur de  $\alpha$  peut être déterminée à partir d'hypothèses physiques (nature du lit du cours d'eau, mesures bathymétriques disponibles, géométrie connue pour un canal artificiel, etc.). Le choix d'une valeur de  $\alpha$  sera discuté avec la présentation d'exemples d'application. Une valeur maximale est souvent induite par des considérations de stabilité des matériaux de fond (généralement  $\sim 40^\circ$  pour un lit granulaire). Une valeur minimale devrait être la pente maximale entre deux

verticales adjacentes dans l'ensemble des données de mesure. Dans cet intervalle, des tests de sensibilité sont utiles pour évaluer la variabilité de l'incertitude calculée.

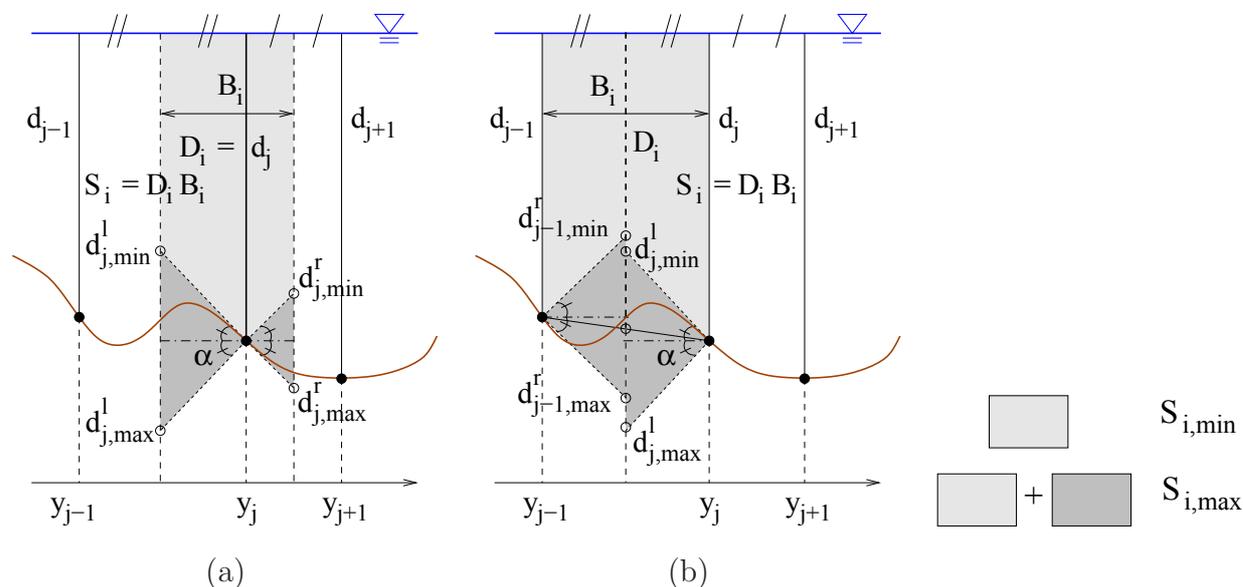


FIGURE 2.2 – Principe du calcul de l'erreur maximale sur la profondeur affectée à la sous-section, liée à l'échantillonnage de la géométrie du lit : (a) procédure d'intégration de la section médiane, (b) procédure d'intégration de la section moyenne.

Le principe de la méthode est illustré Fig.2.2 pour les deux procédures d'intégration de la section médiane et de la section moyenne. La méthode est symétrique pour les deux procédures. Il convient de noter que  $\alpha$  est utilisé pour estimer la variation maximale sur les sections mouillées, et non pour simuler précisément le profil du lit dans les pires des cas. Par conséquent, la discontinuité apparente dans les profils de lit n'est pas un problème. Par ailleurs, la méthode s'applique normalement à la sous-section de rive, puisque les profondeurs aux bords sont données comme pour les verticales de mesure. Un contrôle de vraisemblance pour chaque sous-section consiste à vérifier que la ligne supérieure du lit ne peut pas dépasser la surface libre. Lorsque cette correction locale ne doit pas être appliquée, les formules simples suivantes sont obtenues pour les procédures de la section moyenne et la section médiane, respectivement :

$$u_m(D_i) = \frac{b_i \tan \alpha}{4\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

$$u_m(D_i) = \frac{\tan \alpha (b_{i+1}^2 + b_i^2)}{8\sqrt{3}(b_{i+1} + b_i)} \quad (2.6)$$

avec  $b_i = y_j - y_{j-1}$  et  $b_{i+1} = y_{j+1} - y_j$ .

## 2.3 Intégration transversale de la vitesse et extrapolation de rives

Nous proposons une méthode similaire pour calculer  $u_m(V_i)$  à partir de l'erreur maximale sur la vitesse  $\Delta V_i$  due à l'intégration transversale. En supposant une fonction de densité de probabilité rectangulaire pour les erreurs d'intégration (NF ENV 13005, 1999),  $u_m(V_i) = \Delta V_i / (2\sqrt{3})$ . Pour être cohérent avec la détermination de  $u_m(D_i)$ , les distributions de vitesse dans les pires des cas le long de la sous-section sont interpolées sur la base des profils de lit dans les pires des cas calculés précédemment. Nous utilisons une interpolation en  $d^{1/2}$  pour les vitesses moyennes sur la profondeur  $V$ , ce qui peut être relié à l'hypothèse d'un nombre de Froude (Fulford and Sauer, 1986), ou encore d'un coefficient de Chézy (Boiten, 2000), constant ou variant linéairement, le rayon hydraulique  $R_h$  étant approché par la profondeur locale  $d$  :

$$V = C\sqrt{S} d^{1/2} \quad (2.7)$$

$$V = Fr\sqrt{g} d^{1/2} \quad (2.8)$$

avec  $C$  le coefficient de Chézy,  $S$  la pente d'énergie de l'écoulement,  $Fr$  le nombre de Froude,  $g$  l'accélération de la gravité.

En pratique, le ratio  $\bar{v}_j / \sqrt{d_j}$  est calculé à chaque verticale  $j$ , avec une valeur nulle supposée sur les bords de la section. Puis,  $V / \sqrt{d}$  est interpolé linéairement à la mi-distance entre les verticales, là où les profondeurs min/max ont été estimées précédemment (voir Fig. 2.2). Les vitesses locales min/max résultantes peuvent alors être intégrées de façon linéaire sur la sous-section pour calculer les vitesses moyennes min/max sur la sous-sections, et donc  $\Delta V_i$ .

Comme pour le calcul de  $u_m(D_i)$ , la méthode est symétrique pour les deux procédures section médiane et section moyenne, et la discontinuité apparente dans le profil de vitesse est acceptable puisque le but n'est pas de simuler des distributions de vitesse réaliste, mais d'estimer les variations min/max de la vitesse moyenne sur la sous-section.

Le cas des sous-sections de bords comprises entre chaque rive et la verticale adjacente est spécifique, car la vitesse moyenne sur la sous-section est déterminée par extrapolation, et non par interpolation. Comme fait habituellement, on calcule la vitesse de la sous-section de bord comme  $V_e = m_e/(m_e + 1) \overline{v_{j=0/m}}$ , en se basant sur une extrapolation de vitesse à la paroi, avec une fonction puissance d'exposant  $1/m_e$ . La norme ISO 748 indique que généralement,  $m_e$  se situe entre 5 et 7, mais il peut varier sur une large gamme en fonction de la résistance hydraulique. Comme il sera illustré dans les exemples d'application, l'examen d'un échantillon de jaugeages variés conduit à  $m_e$  variant de 2 (rive très rugueuse) à 10 (rive très lisse). Pour les sous-sections de bord, l'erreur maximale sur la vitesse moyenne est calculée en utilisant ces deux valeurs extrêmes :

$$\Delta V_e = (10/11 - 2/3) \overline{v_{j=0/m}} \approx 0,24 \overline{v_{j=0/m}} \quad (2.9)$$

Pour permettre une analyse plus approfondie des exemples d'application, la composante d'incertitude due à l'extrapolation de vitesse aux bords,  $u_{ed}(V_e) = \Delta V_e/(2\sqrt{3})$ , est présentée séparément du reste de la composante  $u_m(V_i)$ .

# Chapitre 3

## Comparaison des deux méthodes sur des exemples d'application

### 3.1 Présentation des exemples d'application

Un ensemble représentatif de jaugeages réalisés dans des conditions contrastées (Tab.3.1) a été choisi pour montrer et discuter les résultats de la nouvelle méthode proposée, en comparaison avec les résultats de la méthode classique ISO 748 (Eq. 1.3). La procédure de la section médiane a été suivie pour calculer les débits. Les discussions et conclusions s'appliquent également à la procédure de la section moyenne, car les différences dans les débits et dans les composantes d'incertitude calculés sont nulles ou négligeables.

nom	type de section	vitesse [m/s]	largeur $B$ [m]	profondeur $D$ [m]	$B/D$	$m$	$n$
Arc	rivière torrentielle	1	40	0.4	100	20	3
Ardèche	grande rivière	3	80	10	8	17	6
Gignac	canal d'irrigation	0.5	1.34	1.00	1.34	6	10
Labo	canal composé	0.5	1.20	0.05	22	36	4
Burnhaupt	petite rivière	1.8	23	1.5	15	9	1*

TABLE 3.1 – Principales caractéristiques des jaugeages exemples d'application (\* nombre de cycles de courantomètre pour la méthode par intégration).

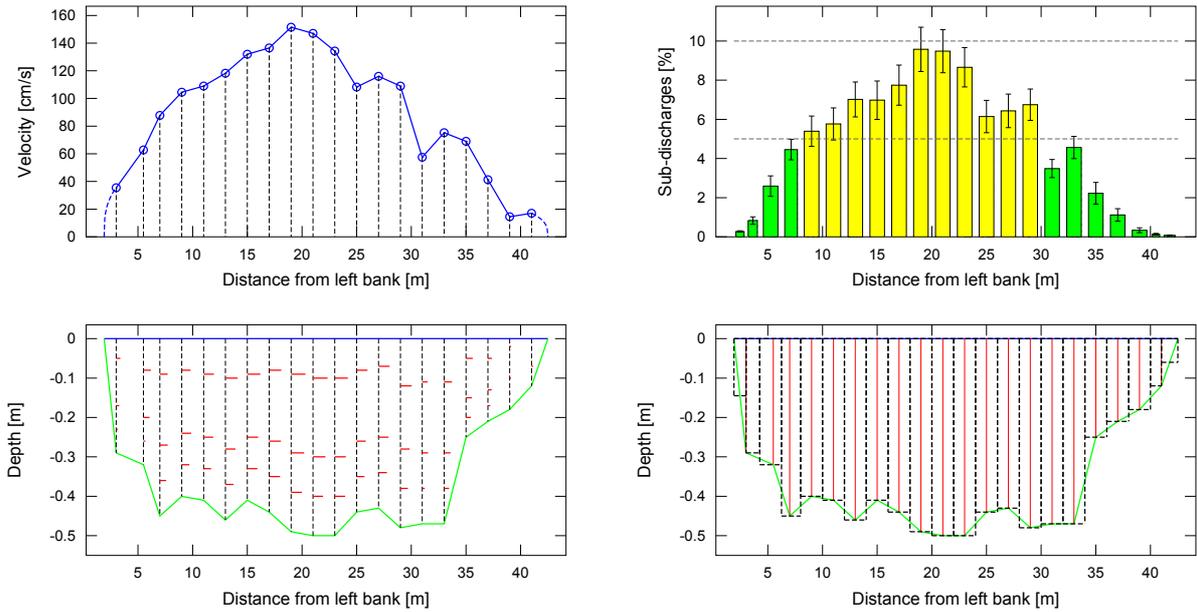


FIGURE 3.1 – Arc-en-Maurienne à Saint-Avre (données Cemagref Lyon).

Le premier exemple, la rivière Arc-en-Maurienne à Saint-Avre (Fig. 3.1), est typique des conditions de faible débit dans une rivière de montagne avec un grand ratio largeur/profondeur : vitesse moyenne  $\approx 1$  m/s, largeur  $B \approx 40$  m, profondeur moyenne  $D \approx 0,4$  m,  $B/D \approx 100$ . Les mesures ont été effectuées en utilisant un courantomètre électromagnétique (Ott Nautilus) monté sur une perche déployée à pied, et également utilisée pour lire les profondeurs d'écoulement. La procédure de la norme ISO 748 pour 3 points de vitesse a été suivie sur 20 verticales, sauf à la dernière verticale où un seul point de vitesse a été mesuré par manque de profondeur. Au niveau de la rive gauche, la variation de vitesse suggère un coefficient de rugosité  $m_e \approx 3$ , qui est également appliqué à la rive droite. Quoi qu'il en soit, les débits extrapolés bord sont négligeables par rapport au débit total. Comme on peut le voir sur l'histogramme des débits par sous-sections (voir Fig. 3.1), ce jaugeage respecte les exigences de la norme ISO 748 puisque tous les sous-débits sont inférieurs à 10% du débit total. En ce sens, cette mesure sera qualifiée de "canonique".

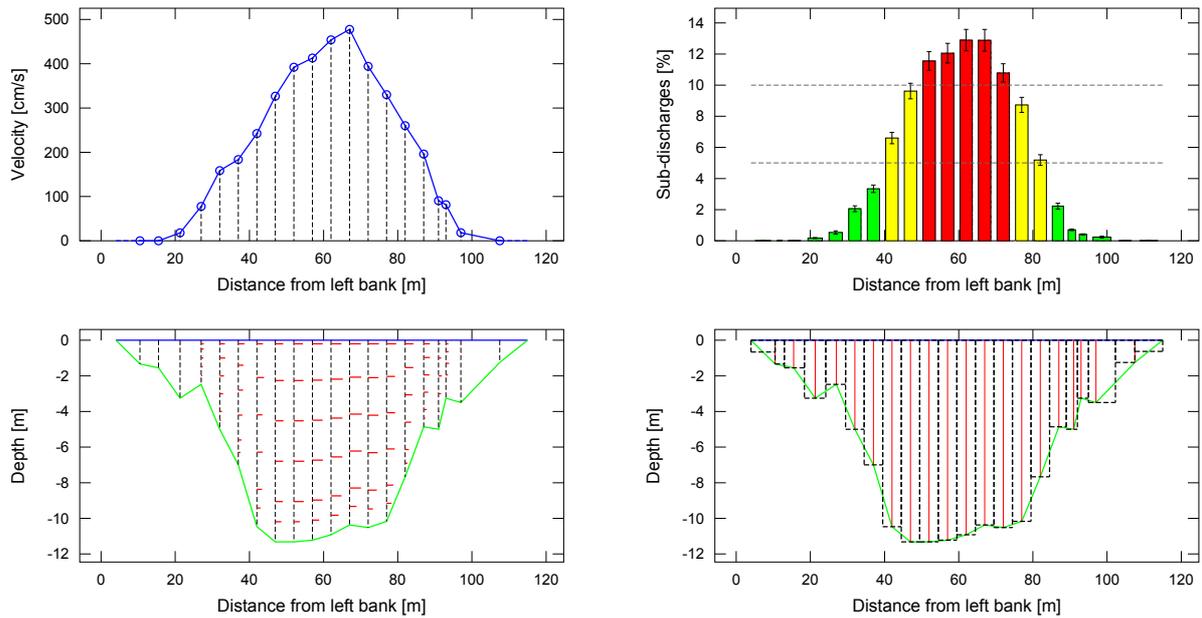


FIGURE 3.2 – Ardèche à Sauze pendant une crue (données CNR).

Le deuxième exemple, l’Ardèche à Sauze (Fig. 3.2), a été choisi comme représentatif des conditions de crue dans une grande rivière avec une beaucoup plus petit ratio largeur/profondeur : vitesse moyenne  $\approx 3$  m/s, largeur efficace  $B \approx 80$  m, profondeur moyenne  $D \approx 10$  m,  $B/D \approx 8$ . Les mesures ont été effectuées à l’aide d’un courantomètre à hélice à axe horizontal (Ott C31) monté sur un saumon de 80 kg déployé à partir d’un téléphérique. Une procédure à 6 points (Olivier et al., 2009) légèrement différente mais équivalente à la procédure à 6 points de la norme ISO 748 a été suivie. Dix-sept verticales ont été distribuées dans la section de manière à échantillonner plus densément les zones où le débit est plus le élevé, près du centre de l’écoulement. Même ainsi, les 5 sous-sections centrales montrent que les débits partiels dépassent légèrement le seuil de 10% recommandé par la norme ISO 748. Néanmoins, cette mesure peut être considérée comme «canonique». Comme la vitesse tombe à des valeurs extrêmement basses à proximité des rives, des coefficients de rugosité de bord ont été arbitrairement fixés à  $m_e = 3$ , les débits extrapolés aux bords étant de toute façon négligeables.

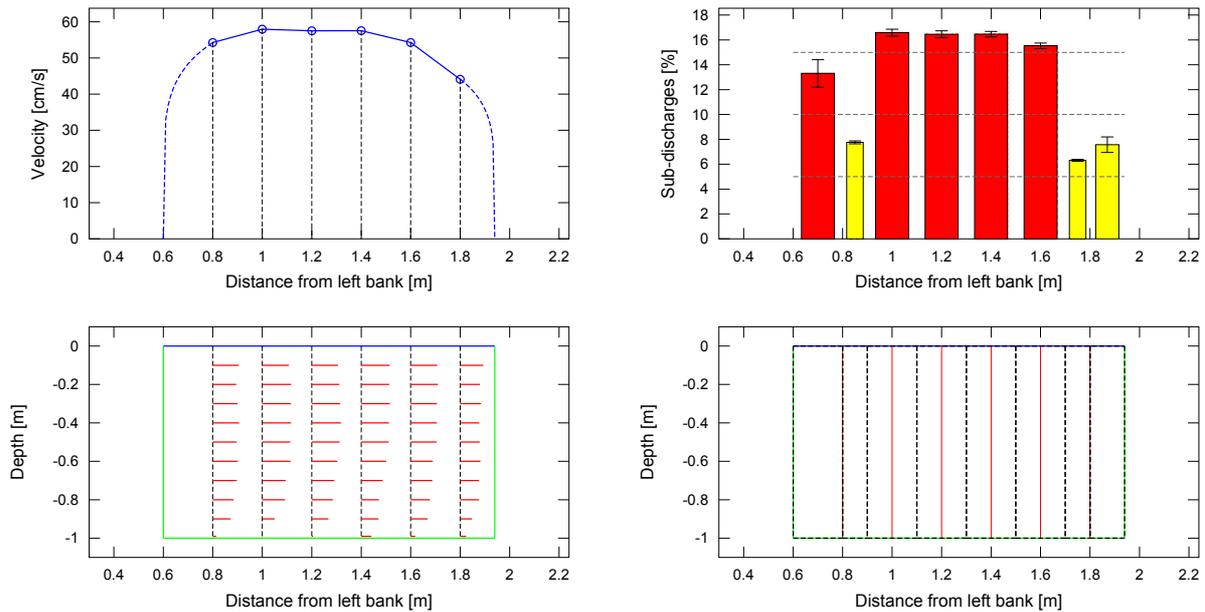


FIGURE 3.3 – Canal d’irrigation de Gignac (données Cemagref Montpellier).

Le troisième exemple, un canal d’irrigation artificiel à Gignac (Fig. 3.3), fournit un échantillonnage de vitesse typiquement dense sur un nombre limité de verticales en travers d’une section étroite rectangulaire, presque carrée : vitesse moyenne  $\approx 0,5$  m/s, largeur  $B = 1,34$  m, profondeur  $D = 1,00$  m,  $B/D = 1,34$ . Les profils verticaux de vitesse ont été échantillonnés de façon détaillée sur 10 positions tous les 10 cm plus une position la plus profonde possible (1 cm au-dessus du fond) en utilisant un micro-moulinet. Même avec ce nombre élevé de points, les recommandations de la norme ISO 748 pour l’intégration verticale directe des vitesses ne sont pas respectées, puisque des variations de vitesse supérieures à 20% apparaissent entre les points les plus proches du fond. Par conséquent, il conviendrait en fait d’écarter les points proches du fond (d’ailleurs sujets à effets de bord) et d’extrapoler le débit de fond sur une portion plus élevée de l’écoulement. En raison de l’étroitesse de la section et de la durée requise pour ces mesures de vitesse détaillées, seulement 6 verticales ont été mesurées. En conséquence, la plupart des sous-débites sont supérieurs à 15 % du débit total, et les débits extrapolés aux bords représentent des contributions significatives (13% et 8%) au débit total. Au niveau des deux berges, la variation de vitesse suggère des coefficients de rugosité  $m_e \approx 6$ , ce qui est cohérent avec des murs de béton assez lisses. Cet exemple de mesure est loin d’être ”canonique”, au sens de la norme ISO 748.

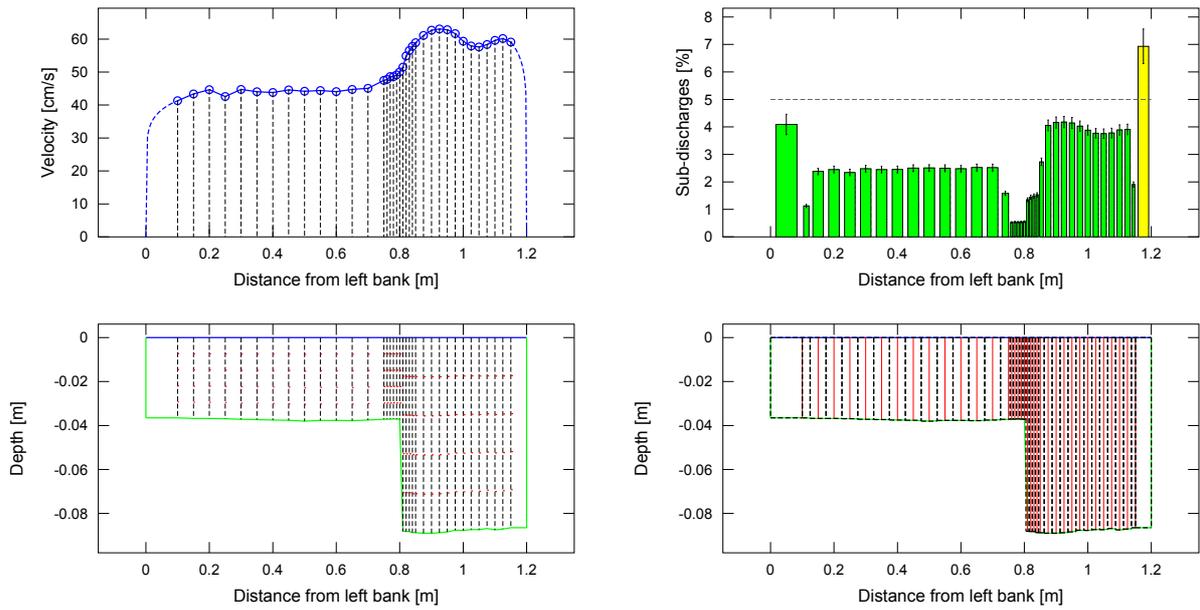


FIGURE 3.4 – Canal à lit composé en laboratoire (données Cemagref Lyon).

Le quatrième exemple n'est pas un cas de terrain, mais un canal à lit composé de laboratoire (Fig. 3.4) dans lequel 4 points de vitesse (tous les  $0,2 h$ ) ont été mesurés sur un très grand nombre de verticales (36) avec un micro-moulinet. Puisque aucune formule à 4 points n'est disponible dans la norme ISO 748, la vitesse ne peut être moyennée verticalement qu'en utilisant soit l'intégration directe soit la formule à 3 points. Cette dernière méthode devrait a priori fournir un résultat moins incertain, comme déjà discuté. Cet exemple est intéressant à étudier car il est représentatif d'un échantillonnage de la vitesse idéalement dense (chaque sous-débit est inférieur à 5 % du débit total), dans une géométrie composée rectangle quasi-parfaite (les irrégularités visibles dans le profil de profondeur sont dues à la déformation de la surface libre), pour pour des conditions d'écoulement stationnaires contrôlées : vitesse moyenne  $\approx 0,5$  m/s, largeur  $B = 1.20$  m, profondeur moyenne  $D = S/B \approx 0,05$  m,  $B/D \approx 22$ . La géométrie composée et la distribution des vitesses induite sont typiques d'un écoulement de crue débordant d'une rivière large, avec des processus hydrauliques complexes à l'interface entre lits mineur et majeur. Près des parois en PVC très lisses, les coefficients de rugosité déduits sont élevés ( $m_e \approx 10$ ). En raison de limitations techniques, les verticales de bord ne sont pas aussi près des murs que souhaité idéalement, et les débits extrapolés aux bords sont importants (4% et 7% du débit total).

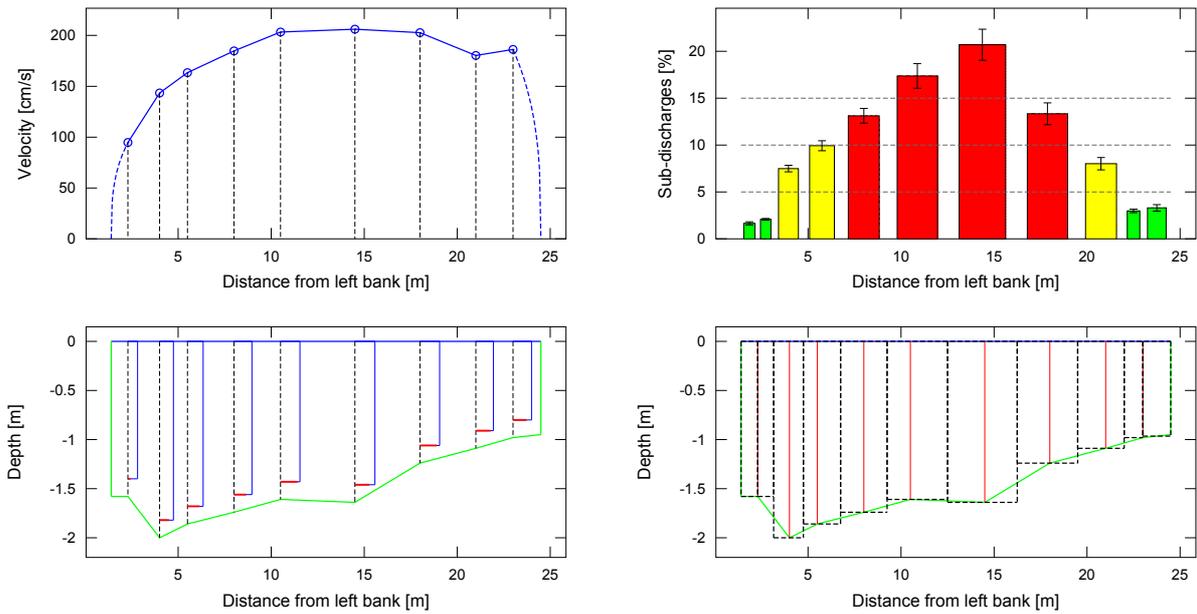


FIGURE 3.5 – Doller à Burnhaupt avec méthode par intégration (données DREAL Alsace).

Le cinquième exemple, la Doller à Burnhaupt (Fig. 3.5), est un jaugeage typique réalisé dans un cours d'eau de taille moyenne, suivant la méthode par intégration : vitesse moyenne  $\approx 1,8$  m/s, largeur efficace  $B \approx 23$  m, profondeur moyenne  $D \approx 1.5$  m,  $B/D \approx 15$ . Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une courantmètre à hélice à axe horizontal déployé à partir d'un pont. Comme c'est souvent le cas dans le but de réduire le temps de mesure lors d'une crue, les recommandations de la norme ISO 748 pour la méthode par intégration n'ont pas été respectées : un seul cycle de descente et montée (au lieu des deux prévus) par verticale a été réalisé sur une durée moyenne de 30 secondes (au lieu de 60 à 100 secondes comme prescrit). De plus, la vitesse verticale du courantmètre est environ deux fois le maximum autorisé par la norme ( $< 0,04$  cm/s et 5% de la vitesse moyenne). La distribution des neuf verticales cherche à mieux échantillonner les variations de débit et de profondeur sur le côté gauche de la section en travers, plutôt que de minimiser les sous-débits, qui dépassent les seuils de 10% et même de 15% dans la partie centrale. Les coefficients de rugosité ont été fixés à  $m_e = 3$  sur les bords, et  $m_b = 6$  au fond pour l'extrapolation des débits.

## 3.2 Comparaison des résultats des deux méthodes

Le Tab. 3.2 présente les résultats d'incertitude obtenus à la fois par la méthode de la norme ISO 748 (Eq. 1.3) et la méthode proposée (Eq. 2.4). Les incertitudes finales  $U$  calculées en utilisant les deux méthodes sont indiquées avec un facteur d'élargissement  $k = 2$  (niveau de confiance 95%). La Fig. 3.6 présente pour chaque exemple d'application un diagramme circulaire (camembert) illustrant la contribution relative des différentes composantes d'incertitude à la variance totale  $u^2(Q)$  (budget d'incertitude). Par exemple, la contribution à la variance due aux mesures de vitesse correspond à :

$$u_{c,e}^2 = \sum Q_i^2 \left[ \frac{1}{n_i} [u_c^2(V_i) + u_e^2(V_i)] \right] / Q^2 \quad (3.1)$$

Les autres contributions à la variance présentées sont dues à l'intégration verticale de la vitesse ( $u_p^2$ ), à l'extrapolation de vitesse au bord ( $u_{ed}^2$ ), à l'intégration transversale de la vitesse ( $u_{m,V}^2$ ), et à l'intégration transversale de la profondeur ( $u_{m,D}^2$ ). Pour une meilleure lisibilité, la contribution due aux erreurs systématiques ( $u_s^2$ , principalement liées à l'étalonnage du courantomètre) est ajoutée à  $u_{c,e}^2$ , et les contributions dues aux mesures de la géométrie ( $u_B^2 + u_D^2$ , en pratique négligeables) sont fusionnés en  $u_{m,D}^2$ . Puisque c'est toujours la principale contribution à l'incertitude calculée suivant la méthode de la norme ISO 748, le ratio  $u_m^2/u^2(Q)$  est également indiqué, à comparer avec le ratio  $[u_m^2(D) + u_m^2(V)]/u^2(Q)$  de la méthode généralisée.

nom	$B/D/m$	angle max.	$\alpha$	$U(Q)$ (généralisée)	$u_m^2(V, D)$ (ratio)	$u_p^2$ (ratio)	$u_{ed}^2$ (ratio)	$U(Q)$ (ISO748)	$u_m^2$ (ratio)
Arc	5.0	15°	15°	6.7%	95%	5%	0%	5.2%	77%
Ardèche	0.5	41°	35°	3.1%	75%	25%	0%	5.7%	86%
Gignac	0.2	0°	10°	1.8%	8%	18%	75%	13.4%	98%
Labo	0.6	3°*	5°	2.2%	3%	64%	33%	3.5%	60%
Burnhaupt	1.7	14°	15°	5.5%	62%	4%**	2%	9.8%	90%

TABLE 3.2 – Resultats de l'analyse d'incertitude des jaugeages exemples d'application (\*, la paroi verticale entre lits mineur et majeur a été ignorée; \*\* pour ce cas, la contribution de  $u_{c,e}^2$  est de 32%).

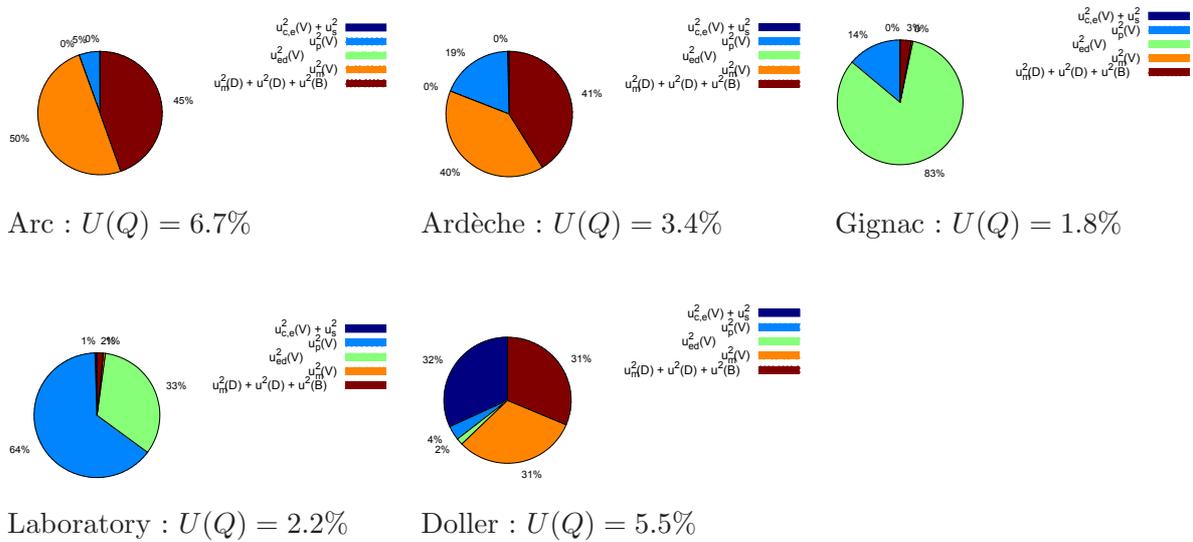


FIGURE 3.6 – Budgets de variance pour les différentes composantes d’incertitude, pour chaque exemple d’application.

Les principaux résultats obtenus pour les cinq exemples d’application en utilisant la méthode généralisée et celle de la norme ISO 748 sont résumés dans le Tab. 3.2. Pour chaque cas, l’angle de variation du fond,  $\alpha$ , a été fixé à une valeur réaliste, généralement proche de l’angle maximum de variation dans les données bathymétriques des verticales du jaugeage. La sensibilité de l’incertitude calculée,  $U(Q)$  (avec un facteur d’élargissement  $k = 2$ ), à la valeur de  $\alpha$  est présentée dans la Section 3.3 ci-après.

En moyenne, les incertitudes  $U(Q)$  calculées avec la méthode proposée sont inférieures aux incertitudes  $U(Q)$  calculées selon la norme ISO 748. La seule exception est le cas de l’Arc, avec une estimation proposée légèrement supérieure à celle de la norme ISO 748 (6,7% au lieu de 5,2%). Pour les jaugeages canoniques ou presque canoniques (Arc, Ardèche, Labo), les estimations de l’incertitude semblent cohérentes quelle que soit la méthode. Pour les mesures avec un nombre réduit de verticales (Gignac, Burnhaupt), la méthode généralisée fournit des estimations de l’incertitude beaucoup plus faibles. Dans le cas du canal d’irrigation de Gignac, un niveau d’incertitude de 2% est plus conforme que 13% à l’expertise de l’hydromètre, et aux vérifications par rapport à des mesures de débit simultanées (les écarts étaient typiquement de l’ordre de 2%).

De telles différences dans le calcul de  $U(Q)$  proviennent d'une plus grande variabilité de la contribution des différentes sources d'erreur, lorsque la méthode généralisée est utilisée. La distribution des composantes de l'incertitude est étudiée dans les sections suivantes.

### 3.3 Incertitude associée à la distribution des verticales

Comme attendu, lors de l'application de la méthode de la norme ISO 748, la contribution du terme  $u_m$  est élevée pour tous les cas, même lorsque la géométrie du fond est très régulière (Gignac : 98%) ou lorsque le nombre de verticales est extrêmement élevé (Labo : 60%). Comme elle prend en compte non seulement le nombre des verticales, mais aussi leur répartition et la variation maximale attendue du lit, la méthode généralisée produit des contributions du terme  $u_m(V, D)$  négligeables pour ces deux cas. L'incertitude due aux extrapolations aux bords,  $u_{ed}$ , uniquement explicitée dans la méthode généralisée, montre constamment des contributions négligeables pour les cas de sections naturelles et au contraire un poids élevé pour les cas de canaux (Labo : 33%, Gignac : 75%).

La sensibilité de l'incertitude calculée par la méthode généralisée à l'angle de variation du fond,  $\alpha$ , a été étudiée en utilisant les cinq exemples d'application (Fig. 3.7). Deux comportements contrastés peuvent être observés. Pour les cas avec de faibles rapports d'aspect de sous-section (Ardèche, Gignac, Labo,  $B/D/m < 1$ ), les variations de  $U(Q)$  selon  $\alpha$  sont négligeables. Pour les cas avec des rapports d'aspect de sous-section plus élevés (Burnhaupt :  $B/D/M = 1,7$ , Arc :  $B/D/M = 5$ ),  $U(Q)$  augmente à peu près linéairement avec  $\alpha$ , jusqu'à 15-20% pour  $\alpha = 40^\circ$ . Une telle tendance était attendue d'après la construction de la méthode de calcul de  $u_m(D)$  et  $u_m(V)$ . Il est logique que les sections larges et peu profondes nécessitent plus de verticales que les sections étroites et profondes. Avec les valeurs de  $\alpha$  fixées en conformité avec les angles maximaux observés dans la bathymétrie mesurée (voir Tab. 3.2), les valeurs obtenues pour  $U(Q)$  sont réalistes.

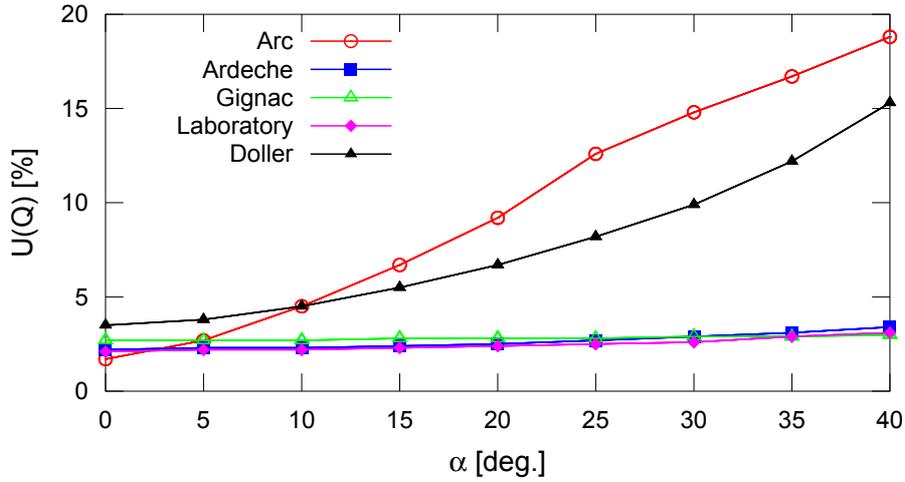


FIGURE 3.7 – Influence de l’angle de variation du fond,  $\alpha$ , sur l’incertitude  $U(Q)$  (niveau de confiance 95%) calculée selon la méthode généralisée, pour tous les exemples d’application.

### 3.4 Incertitude associée à la mesure et l’intégration verticale de la vitesse

Dans la plupart des cas, les composantes d’incertitude associées à la mesure de la vitesse ( $u_s$ ,  $u_c$ ,  $u_e$ ) apportent une contribution négligeable à l’incertitude finale. En effet, la contribution de  $u_{c,e}^2$  n’est significative que pour le cas de Burnhaupt (32%), parce que la méthode d’intégration est utilisée.

La composante d’incertitude associée à l’intégration verticale de la vitesse,  $u_p$ , apporte souvent une part importante, mais pas dominante, de l’incertitude totale. Elle est particulièrement importante dans le cas Laboratoire, où l’incertitude pourrait être réduite avec un meilleur échantillonnage des profils de vitesse, au moins dans le lit mineur plus profond.

Afin d’évaluer les résultats de la méthode proposée pour le calcul de  $u_p$  dans le cas de l’intégration verticale directe, des tests de sensibilité ont été effectués en utilisant le jeu de données de Gignac, qui offre un grand nombre (10) de points de vitesse situés à des positions normalisées au-dessus du lit. Le Tab. 3.3 présente les valeurs de  $u_p$  moyennes sur les six verticales, pour différent nombres de points de vitesse, en utilisant soit des formules algébriques soit l’intégration directe (méthode de distribution des vitesses). Les valeurs d’incertitude pour les formules algébriques sont celles fournies par la norme NF

EN ISO 748 (2009), étendues avec un ajustement en puissance. La valeur indiquée pour 10 points (0,5%) ne correspond pas à une formule algébrique, mais est la valeur proposée par la norme ISO 748 pour une intégration directe respectant tous les critères de la norme.

Les valeurs de  $u_p$  calculées dans le cas de l'intégration directe de la vitesse sont compatibles avec celles de la norme ISO 748, sauf quand seulement 1 point est utilisé : une valeur considérablement élevée (38%, au lieu de 7,5%) est obtenue parce qu'une extrapolation de débit est alors réalisée sur l'ensemble de la profondeur d'écoulement. Même si cette valeur peut sembler exagérée, il n'est pas improbable que l'utilisation d'un seul point pour une intégration directe puisse conduire à des erreurs beaucoup plus élevées que quand la formule algébrique plus robuste à 1 point est employée. Selon la méthode de calcul proposée, l'intégration directe appliquée à 2-3-4 points de la vitesse conduit à des incertitudes ( $\approx 5\%$ , niveau de confiance à 68%) plus élevées que celles associées aux formules algébriques correspondantes. Pour 5 ou 6 points, les niveaux d'incertitude sont similaires. Ceci est cohérent avec l'expertise des équipes hydrométriques. C'est aussi parce que des mesures de vitesse près de la surface et près du fond sont alors utilisées, réduisant les extrapolations dans les couches haute et basse. Enfin, pour une intégration directe sur 10 points, la méthode proposée donne une valeur de  $u_p$  légèrement supérieure à la valeur par défaut de la norme ISO 748. Cette valeur (1,2%) reste réaliste et négligeable, en tenant compte du fait que les mesures de vitesse à Gignac ne correspondent pas exactement aux exigences de la norme ISO 748.

$p$ (nombre de points)	1	2	3	4	5	6	10
$u_p$ (algébrique, ISO 748)	7.5%	3.5%	3.0%	–	2.5%	2.0%	0.5%*
$u_p$ (int. directe)	38%	4.8%	4.5%	4.6 %	2.4%	2.3%	1.2%

TABLE 3.3 – Composante d'incertitude  $u_p$  due à l'intégration verticale de la vitesse, calculée selon la méthode généralisée appliquée au jeu de données de Gignac. Pour un nombre donné de mesures de vitesse,  $p$ , positionnées aux hauteurs normalisées au-dessus du fond, à la fois les formules algébriques et l'intégration directe (ou méthode de distribution des vitesses) sont considérées (\* valeur proposée dans la norme ISO 748 pour l'intégration directe).

# Conclusions

Une nouvelle méthode de calcul de l'incertitude des débits mesurés par exploration du champ des vitesses a été développée et testée avec succès sur une série d'exemples d'application. Cette méthode a été construite comme une généralisation de la méthode conventionnelle de la norme NF EN ISO 748 (2009) pour pallier les inconvénients identifiés de cette dernière méthode. En particulier, des méthodes de calcul direct pour les composantes d'incertitude liées à l'intégration spatiale ( $u_p$ ,  $u_m(D)$ ,  $u_m(V)$ ) ont été proposées au lieu des valeurs informatives tabulées dans la norme ISO 748. Les extrapolations de débit sur les bords et dans les couches de surface et de fond sont explicitement prises en compte, ainsi que la distribution des verticales à travers la section transversale. Un autre avantage est que les incertitudes dues à l'échantillonnage spatial de la profondeur et de la vitesse sont séparées. Seul un paramètre supplémentaire est introduit : l'angle  $\alpha$  permet d'évaluer l'erreur maximale sur l'aire mouillée calculée entre deux verticales. Des lignes directrices pour choisir la valeur de  $\alpha$  ont été fournies, ainsi qu'une analyse de sensibilité sur ce paramètre.

La nouvelle méthode semble être plus polyvalente mais aussi simple et robuste que la méthode ISO 748. Elle peut être facilement mise en œuvre dans les logiciels habituels de dépouillement des jaugeages. Des résultats similaires à ceux de la méthode ISO 748 ont été obtenus pour les jaugeages canoniques effectués dans les sections naturelles, tandis que des niveaux d'incertitude plus variables et plus pertinents ont été calculés pour les cas moins canoniques, en particulier dans les canaux artificiels avec une forme régulière et un ratio largeur-profondeur faible ( $B/D < 10$ ). Bien que des essais de validation supplémentaires restent nécessaires, la méthode déjà fourni des résultats intéressants, notamment concernant la contribution des différentes sources d'erreur. Le plus souvent, les erreurs d'intégration

spatiale sont dominantes sur les erreurs instrumentales et environnementales. Sans augmenter le temps de travail sur le terrain de façon significative, les erreurs d'intégration spatiale peuvent être réduites en utilisant des verticales supplémentaires où la profondeur est mesurée mais la vitesse est interpolée sans être mesurée.

Lorsque l'incertitude totale calculée est très faible ( $U(Q) < 3\%$ ), les erreurs instrumentales et environnementales qui pourraient avoir été sous-estimées ou ignorées devraient être gardées à l'esprit. Surtout, les erreurs supplémentaires en cas de débit variable doivent être évaluées. Des équations simples pour calculer l'erreur d'intégration temporelle et l'effet d'hystérésis due aux effets transitoires ont été proposées pour compléter l'analyse d'incertitude.

Comme perspective, la méthode d'incertitude généralisée pourrait être étendue à d'autres techniques de mesure du débit dérivées de la méthode d'exploration du champ des vitesses, à savoir les mesures de vitesse de surface et les profileurs acoustiques de courant à effet Doppler (ADCP). Les jaugeages par mesures de vitesse de surface sont particulièrement utiles dans des conditions de crue difficiles, quand l'intrusion d'instruments au sein de l'écoulement peut être dangereux, voire impossible. Ils peuvent être réalisés avec différentes techniques allant des courantomètres montés sur saumon, des flotteurs naturels ou artificiels, à l'analyse de séquences d'images, ou à la vélocimétrie radar. L'évaluation de l'incertitude de mesure de vitesse ponctuelle à la surface doit alors être adaptée à l'instrumentation spécifique utilisée. Une incertitude supplémentaire se manifeste en raison de la nécessaire conversion de la vitesse de surface en vitesse moyenne sur la verticale (généralement effectuée via un coefficient constant), et en raison des hypothèses sur la bathymétrie quand elle ne peut pas être mesurée lors du jaugeage.

La méthode proposée peut être étendue presque directement aux jaugeages ADCP quand ils sont menés en mode stationnaire (verticale par verticale). Toutefois, les ADCP sont généralement déployés en suivant la technique du bateau mobile qui s'appuie sur un modèle mathématique différent de la méthode d'exploration du champ des vitesses. Le développement d'une méthodologie dédiée pour le calcul des incertitudes sur les mesures de débit par ADCP mobile est encore une question scientifique ouverte.

# Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé dans le cadre de la convention DGPR(SCHAPI)/Cemagref 2010 sur la prévision des inondations (volet hydrométrie).

Les opérateurs qui ont produit toutes les données et informations utilisées dans cette étude sont chaleureusement remerciés, en particulier Thierry Pantel (CNR), José Ribot-Bruno (Cemagref Montpellier), Fabien Thollet et Yann Peltier (Cemagref Lyon), et Guillaume Philips et Daniel Moritz (DREAL Alsace).

# Bibliographie

- NF EN ISO 748 (2009), Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de débitmètres ou de flotteurs, *ISO*, 57 p.
- NF ENV 13005 (1999), Guide pour l'expression des incertitudes de mesure (Guide to the expression of uncertainty in measurement - GUM), *ISO*, 120 p.
- Boiten W. (2000), *Hydrometry, Francis and Taylor publishers*, 242 p.
- Carter, R.W., Anderson, I.E., 1963. Accuracy of current meter measurements. *Journal of the Hydraulics Division. Proc. ASCE*, HY4, 105–115.
- Fulford, J., Sauer, V., 1986. Comparison of velocity interpolation methods for computing open-channel discharge. *U.S. Geological Survey Water-supply Paper 2290*, 139–144.
- Herschy, R.W. (1999). *Hydrometry, Principles and Practices*, Second edition, Wiley, 376 p.
- Herschy, R.W. (2002). The uncertainty in a current meter measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13, 281–284.
- Jones, B.E. (1916). A method of correcting river discharge for a changing stage. *Water Supply Paper 375*, U.S. Geological Survey, 117–130.
- Kiang, J.E., Cohn, T.A., Mason, R.R. (2009). Quantifying uncertainty in discharge measurements : A new approach. *World Environmental and Water Resources Congress 2009 : Great Rivers*, 342, 5924-5931
- Olivier, A., Pierrefeu, G., Scotti, M., Blanquart, B. (2009). Incertitude des mesures de débit réalisées à l'ADCP. *La Houille Blanche*, 3, 132–137, doi : 10.1051/lhb/2009037.

Pelletier, P.M. (1988). Uncertainties in the single determination of river discharge : a literature review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 15, 834–850.

Rantz, S. E., 1982. Measurement and computation of streamflow. Vol. 1, Measurement of stage and discharge, Water-Supply Paper 2175. U. S. Geological Survey, Washington.

Sauer, V.B. (1992). Determination of error in individual discharge measurements. USGS Open-File Report 92-144, 21 p.

SonTek/YSI (2007). Discharge uncertainty calculations in the SonTek/YSI FlowTracker and RiverSurveyor : stationary-measurements. SonTek/YSI Technical Notes, 8 p.