

Prise en compte de la qualité de l'échantillonnage dans l'estimation de l'incertitude des jaugeages par exploration du champ des vitesses (méthode Flaure)

Aurélien DESPAX^{1,2,3}, Christian PERRET⁴, Remy GARCON¹, Alexandre HAUET¹, Arnaud BELLEVILLE¹, Jérôme LE COZ³, Anne-Catherine FAVRE²

¹ EDF-DTG, 21 Avenue de l'Europe, BP 41, 38040 Grenoble, France, e-mail : aurelien.despax@irstea.fr

² Université Grenoble Alpes, LTHE, 38000 Grenoble, France

³ Irstea, UR HHLy, 5 rue de la Doua, 69100 Villeurbanne, France

⁴ 7 rue du Fangeat, 38500 Voiron, France

RÉSUMÉ. – Lors des crises (sécheresses ou crues) les données hydrométriques participent directement aux processus de décision pour la gestion en temps réel de la ressource en eau et des risques mais également à l'analyse a posteriori pour le règlement des litiges. Pour pouvoir prendre des décisions cohérentes, il est essentiel de connaître l'incertitude associée aux données de débit. Si les techniques hydrométriques se sont nettement améliorées au cours des dernières décennies, l'estimation des incertitudes reste un défi pour la communauté de l'hydrométrie en l'absence d'étalon de débit en milieu naturel. Cette étude, portant sur la quantification des incertitudes des jaugeages au courantmètre, s'inscrit dans une suite de travaux récents dont la perspective vise la mise à jour potentielle de la norme ISO 748. Une méthode de propagation analytique des incertitudes, nommée Flaure, est exposée dans cet article. Elle permet de pallier les inconvénients des méthodes existantes et vise l'objectivation des différentes sources d'incertitude. Une attention particulière est portée au terme prépondérant u'_m d'incertitude due à l'intégration latérale des profils de vitesse et de profondeur. Grâce à l'étude de jaugeages de référence à haute résolution latérale, un lien a été établi entre les erreurs d'interpolation latérale et un indice de qualité d'échantillonnage calculable pour tout jaugeage réalisé au courantmètre.

Mots-clés : Mesure de débit, Incertitude, Jaugeage, Courantomètre, Exploration du champ des vitesses, Qualité de l'échantillonnage.

Considering sampling quality for estimating the uncertainty of gaugings using the velocity-area method (Flaure method)

ABSTRACT. – During crisis (droughts or floods) hydrometric data are essential for decisions related to real-time water resource and risk management but also afterwards in cases of disagreement. Estimating the uncertainty of discharge measurements is necessary to make consistent decisions. Although discharge measurement techniques have improved in recent decades, uncertainty analysis remains a challenge in hydrometry due to the lack of discharge standards in the field. This study aims at estimating the uncertainty of velocity-area discharge measurements with potential perspective of updating the ISO 748 standard. To address the limitations of existing methods, this study presents a new analytical propagation method, called Flaure, to estimate the uncertainty components. Special attention is paid to the estimation of the dominant u'_m component related to cross-sectional interpolation errors of velocities and depths. High-resolution reference gaugings are used to assess the uncertainty component through a statistical analysis. The method then establishes an explicit link between the estimation of cross-sectional interpolation errors and a sampling quality index that can be computed for any given current-meter discharge measurement.

Keywords: Discharge measurement, Uncertainty, Stream-gauging, Current-meter, Velocity-area method, Sampling Quality.

I. INTRODUCTION

Les données hydrométriques participent directement aux processus de décision pour la gestion en temps réel des ressources en eau et des risques mais également à l'analyse a posteriori pour le règlement des litiges. Pour pouvoir prendre des décisions, il est essentiel de connaître l'incertitude associée aux données de débit.

Cette étude vise à améliorer le processus de quantification des incertitudes des jaugeages au courantmètre selon la méthode d'exploration du champ des vitesses. Ces dernières répondent à des enjeux ponctuels tels que le contrôle d'un

débit réservé, ou de manière pérenne pour la construction et le suivi des courbes de tarage permettant l'obtention de chroniques temporelles de débit.

Face aux limites des méthodes analytiques existantes exposées dans la partie II, la partie III propose une nouvelle estimation du terme prépondérant d'incertitude dû à l'intégration latérale des profils de vitesse et de bathymétrie, noté u'_m dans la norme ISO 748 [ISO, 2009]. Cette méthode, nommée Flaure [Despax, 2016], est basée sur l'étude de jaugeages de référence à forte densité d'échantillonnage qui permettent de définir une relation entre le terme u'_m en fonction d'un indice de qualité d'échantillonnage (SQI).

La partie III propose l'application du calcul d'incertitude à différents jaugeages issus d'une base de données de la Division Technique Générale d'EDF (EDF-DTG). Ces résultats sont confrontés aux valeurs estimées selon la norme ISO 748 [ISO, 2009], la méthode IVE [Kiang *et al.*, 2009] [Cohn *et al.*, 2013] et la méthode Q+ [Le Coz *et al.*, 2012] [Le Coz *et al.*, 2014]. Enfin, quelques conclusions et perspectives mettront en évidence les travaux à poursuivre ainsi que l'applicabilité probable à d'autres configurations de jaugeage.

II. POSITION DU PROBLÈME ET LIMITES DES MÉTHODES EXISTANTES

II.1. Jaugeages par exploration du champ des vitesses – Principes et sources d'incertitude

Un jaugeage par exploration du champ des vitesses consiste à intégrer spatialement les profondeurs du cours d'eau (la bathymétrie) et les vitesses sur un semis de points distribués horizontalement et verticalement à travers une section en travers [Hersch, 1993]. En pratique, les points de mesure (en termes de vitesse et de profondeur) sont répartis sur des verticales, d'indice i et le débit est calculé comme la somme des débits partiels associés à chacune des verticales et des débits des sous-sections de rive, comme exprimé à l'équation (1).

$$Q_{total} = \sum_{i=0}^{m+1} Q_i = Q_0 + Q_{m+1} + \sum_{i=1}^m B_i D_i V_i, \quad (1)$$

où Q_p , B_i et D_i correspondent respectivement au débit, à la largeur et à la profondeur de chacune des sous-sections i . Q_0 et Q_{m+1} désignent les débits partiels des sous-sections de rive. V_i est la vitesse moyenne normale à la sous-section i calculée par intégration des n_i mesures ponctuelles de vitesse de la verticale i .

En plus des erreurs inhérentes à la mesure élémentaire des abscisses, des profondeurs et des vitesses, l'incertitude de ce type de mesure dépend en grande partie de la qualité de l'échantillonnage réalisé pour mesurer la complexité des profils bathymétriques et des vitesses moyennes sur la largeur du cours d'eau. Notons que la stabilité du débit ainsi que la qualité de la section de jaugeage choisie contribuent également à l'incertitude de l'estimation du débit.

II.2. État de l'art des méthodes analytiques d'estimation d'incertitude

Les premiers travaux portant sur l'expression de l'incertitude des jaugeages par exploration du champ des vitesses ont été portés par Carter et Anderson [1963] et Hersch [1975]. Leurs conclusions sont à l'origine du calcul que l'on retrouve dans la norme ISO 748 qui n'a guère évolué depuis les années 1980. L'émergence de nouveaux enjeux sociétaux liés à la gestion des ressources en eau a rendu primordial une meilleure connaissance de la qualité de l'estimation du débit via l'analyse d'incertitude. Dans ce contexte, des travaux récents ont proposé des méthodes alternatives au calcul de la norme ISO 748 [Kiang *et al.*, 2009] [Le Coz *et al.*, 2012].

Les méthodes qui sont présentées ci-après suivent les principales recommandations du *Hydrometric Uncertainty Guidance* [ISO, 2007] à savoir que l'incertitude finale est exprimée en % du résultat de débit Q et notée $U'(Q)$ au niveau de confiance de 95 % (soit un facteur d'élargissement d'environ $k = 2$, traduisant une probabilité d'être à plus ou

moins deux écarts-types, sous l'hypothèse d'une distribution de l'incertitude gaussienne). On note que les incertitudes-types portant sur la grandeur x_p , notées $u'(x)$, sont exprimées au niveau de confiance de 68 %.

III.2.1. Méthode ISO 748

La norme ISO 748 propose d'estimer l'incertitude-type combinée (relative et au niveau de confiance de 68 %) du débit comme :

$$u'^2(Q) = u'^2_s + u'^2_m + \frac{\sum_{i=1}^m Q_i^2 \left[u'^2(B_i) + u'^2(D_i) + u'^2_p(V_i) + \frac{1}{n_i} \{ u'^2_{\exp}(v_{i,j}) + u'^2_c(v_{i,j}) \} \right]}{\left(\sum_{i=1}^m Q_i \right)^2} \quad (2)$$

On note que le calcul proposé par l'équation (2) est similaire à une application littérale du guide pour l'expression de l'incertitude (GUM) [JCGM, 2008] [Hersch, 2002]. Les incertitudes-types relatives $u'(x)$ sont explicitées dans la norme ISO 748.

La méthode de calcul d'incertitude proposée dans la norme ISO 748 présente un certain nombre de limites (voir par exemple Le Coz *et al.* [2012], Le Coz *et al.* [2014] ou Despax [2016]). Le problème principal provient de l'estimation du terme d'incertitude u'_m représentant la composante d'incertitude due à l'intégration transversale du profil des vitesses et du profil bathymétrique. La norme ISO 748 propose en effet l'utilisation des valeurs informatives tabulées dans l'annexe E de la norme. Ces valeurs sont issues d'études empiriques non documentées spécifiques aux conditions de mesure des essais (morphologie de la section de mesure et régularité des écoulements notamment). L'estimation du terme u'_m dépend uniquement du nombre de verticales ne prenant en compte ni la répartition spatiale des verticales de mesure, ni la complexité de la distribution des écoulements. Ainsi, la quantification de l'incertitude ne permet pas d'indiquer si la complexité morphologique de la section de mesure et la complexité du profil des écoulements ont été correctement décrites par l'échantillonnage des verticales. Le poids prépondérant de ce terme dans l'incertitude finale (voir la figure 6 à gauche) a conduit la charte qualité de l'hydrométrie [Forray *et al.*, 1998] à déconseiller l'application de ce calcul.

III.2.2. Méthode Q+

La méthode Q+ [Le Coz *et al.*, 2012 ; Le Coz *et al.*, 2014] propose une amélioration de l'estimation du terme u'_m en proposant une décomposition de ce dernier en deux termes : le terme $u'_m(D)$ lié à l'incertitude sur la bathymétrie et le terme d'incertitude dû à l'intégration latérale des profils de vitesse $u'_m(V)$. Ces termes sont estimés en considérant des scénarios extrêmes probables. L'estimation du terme $u'_m(D)$ repose par exemple sur la définition d'un angle α traduisant la pente maximale possible du profil bathymétrique. Plus l'angle α est grand et plus l'incertitude sera élevée traduisant un profil bathymétrique potentiellement irrégulier. L'inconvénient de cette méthode repose sur la difficulté à objectiver cet angle. L'incertitude finale est en effet très dépendante de ce terme d'incertitude [Despax, 2016b].

III.2.3. Estimateur de la variance d'interpolation (IVE)

Une approche alternative nommée IVE (pour Interpolated Variance Estimator) a été développée et étudiée par [Kiang

et al., 2009] et [Cohn *et al.*, 2013]. Elle part de l'hypothèse que les verticales doivent être choisies de manière à décrire les principales caractéristiques de la bathymétrie et du profil des vitesses. Ainsi, si le nombre de verticales est adéquat, les profondeurs et les vitesses doivent varier doucement sur la largeur du chenal et les verticales adjacentes doivent montrer une variation quasi linéaire des vitesses et de la profondeur. A l'inverse, si les profils de vitesse et de bathymétrie s'écartent trop d'une droite, il est considéré que le nombre de verticales est insuffisant.

Si les profils de vitesse et de profondeur ne sont pas suffisamment échantillonnés, la méthode IVE est très sensible à une forte non linéarité entre les mesures des grandeurs D_i et V_i conduisant à des valeurs d'incertitude parfois très élevées [Despax *et al.*, 2016b].

III. NOUVELLE MÉTHODE FLAURE

Le terme d'incertitude dû à l'échantillonnage latéral des profils latéraux de vitesses moyennes et de profondeur (u'_m) est généralement le terme prépondérant dans le calcul d'incertitude. Que ce soit via la norme ISO 748, la méthode Q+ ou la méthode IVE, son estimation n'est pas satisfaisante car ni la qualité de l'échantillonnage ni la complexité de la section de jaugeage ne sont prises en compte simultanément.

La méthode Flaure [Despax, 2016a], propose la définition d'un indicateur de qualité d'échantillonnage puis l'estimation de l'incertitude u'_m sur la base d'un jeu de 53 jaugeages de référence réalisés avec une forte densité spatiale de verticales sur plusieurs sites. Ces derniers sont représentatifs de la diversité de section de jaugeage que l'on peut rencontrer. Ces jaugeages sont sous-échantillonnés afin de produire des jaugeages probables (c'est-à-dire similaires à des jaugeages réalisés *in situ* par un hydromètre). Le débit des jaugeages sous-échantillonnés est ensuite comparé à celui des jaugeages de référence complets et une analyse statistique est conduite afin d'estimer le terme u'_m en fonction de l'indice de qualité d'échantillonnage.

III.1. Indice de qualité d'échantillonnage

Les recommandations métier que l'on retrouve dans la littérature s'accordent sur la qualité d'un bon échantillonnage.

Celui-ci doit garantir une répartition latérale des verticales suffisamment homogène (les verticales doivent être bien réparties sur la largeur du cours d'eau) et permettre une bonne description des variations de profondeur et de vitesse entre les verticales (c'est-à-dire que les variations des grandeurs mesurées doivent être faibles et du même ordre sur toute la section). On traduit ces propos à travers un indicateur simple applicable à tout jaugeage : l'indice de qualité d'échantillonnage (ou *SQI* pour *Sampling Quality Index*) qui s'exprime comme :

$$SQI = \frac{\sigma(\Delta q)}{\sigma(q)} \times \frac{\sum_{i=1}^m (\Delta x_i \times \Delta q_i)}{Q_{total}}, \quad (3)$$

avec : $\Delta x_i = |x_{i-1} - x_i|$ et $\Delta q_i = |q_{i-1} - q_i|$, où q_i représente le débit unitaire (exprimé en $[m^2/s]$) soit le produit de la profondeur D_i par la vitesse moyenne V_i , calculé sur la verticale d'indice i à l'abscisse x_i [m]. Q_{total} est le débit total du jaugeage exprimé en $[m^3/s]$.

Ce critère adimensionnel possède l'avantage de prendre en compte :

- Le rapport entre l'écart-type des variations de q entre deux verticales adjacentes ($\sigma(\Delta q)$) et l'écart-type des q sur l'ensemble du jaugeage ($\sigma(q)$). Pour une section donnée, le dénominateur de ce ratio est plutôt stable, quelle que soit la répartition des verticales, puisqu'il traduit la variabilité intrinsèque des q sur la section. Le numérateur, quant à lui, prendra des valeurs d'autant plus faibles que le nombre de verticales réalisées est grand et que les variations des q entre les verticales adjacentes est faible.
- L'espacement entre les verticales (à travers la grandeur Δx_i). Une augmentation de la distance entre les verticales engendre généralement une valeur de *SQI* plus importante.
- La variation des q entre deux verticales adjacentes (Δq_i). La valeur du *SQI* sera d'autant plus grande quand les variations de q seront importantes.

En théorie, une valeur de *SQI* nulle est possible mais cela traduirait un espacement des verticales infinitésimal. Cet indice permet de qualifier la qualité de l'échantillonnage. Les valeurs usuelles de *SQI* sont inférieures à 1.

La figure 1 montre la distribution latérale des débits unitaires et le profil bathymétrique du jaugeage du Lot à la station hydrométrique de Bramonas (10 verticales) et du Gave à la station hydrométrique d'Arras Nouaux (11 verticales) et

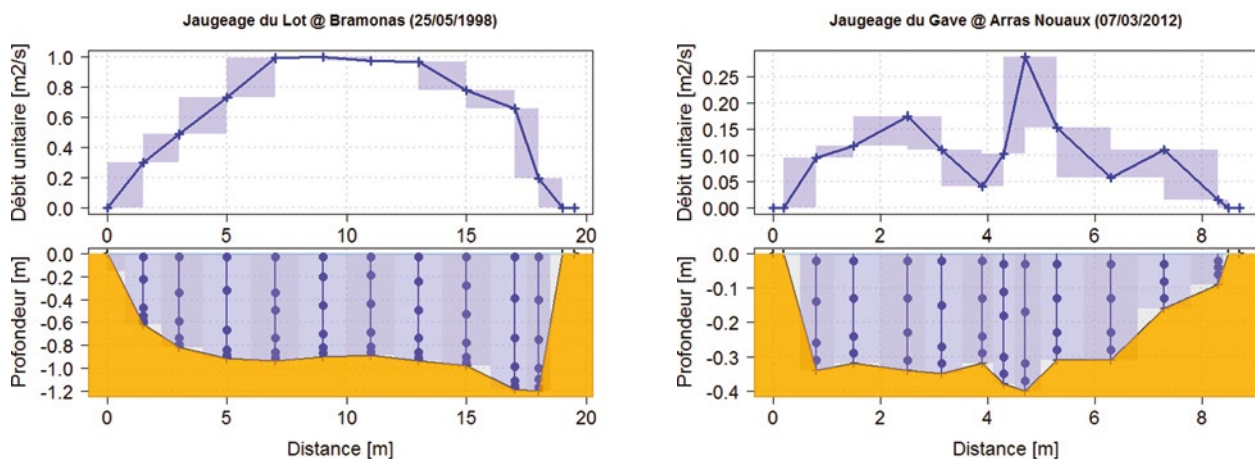


Fig. 1 : Distributions latérales des débits unitaires et profils bathymétriques des jaugeages du Lot à la station hydrométrique de Bramonas (25/05/1998, 10 verticales) et du Gave à la station hydrométrique d'Arras Nouaux (07/03/2012, 11 verticales).

du jaugeage du Gave à la station hydrométrique d'Arras Nouaux (11 verticales). Les valeurs de SQI sont respectivement de 0,08 et de 0,46. L'échantillonnage du jaugeage du Lot peut être considéré comme bon tandis que l'échantillonnage du Gave est plus médiocre devant la variabilité du débit unitaire. Les aires colorées en bleu, représentant le produit de Δx_i par Δq_i , sont en effet bien plus importantes pour le jaugeage du Gave que pour le jaugeage du Lot. On peut conclure que l'erreur sur l'intégration latérale des vitesses et de la profondeur sera raisonnablement plus forte pour le jaugeage du Gave.

III.2. Jaugeages de référence

Un ensemble de 53 jaugeages à grand nombre de verticales (ou jaugeages de référence) a été constitué. 36 jaugeages au courantomètre ont été réalisés sur des cours d'eau français et néo-zélandais de faible largeur (de 3 à 35 [m]). Des jaugeages réalisés à l'ADCP ont été utilisés et transformés en jaugeages équivalents au courantomètre afin de disposer de sections de jaugeage plus profondes (jusqu'à 15 [m]) et plus larges (plus de 300 [m]). L'exécution d'un jaugeage de référence prenant beaucoup de temps, on a vérifié pour chacun d'eux la stabilité du débit lors de leur réalisation. Afin de compléter le jeu de jaugeages de référence par des sections de rivière de forme géométrique maîtrisée (rectangulaire, trapézoïdale), 10 jaugeages ont été modélisés grâce à l'utilisation d'un modèle hydraulique 2D (Telemac 2D). Les caractéristiques de l'ensemble des jaugeages en termes de largeur, de profondeur, de débit et de nombre de verticales sont détaillées dans l'étude de [Despax *et al.*, 2016a].

Un exemple de jaugeage de référence, réalisé sur la Souloise à l'Infernet, à fort échantillonnage latéral est représenté à la figure 2.

III.3. Sous-échantillonnage

Une méthode de sous-échantillonnage a été appliquée à l'ensemble des jaugeages de référence. Celle-ci a permis de générer des jaugeages sous-échantillonnés probables, c'est-à-dire tels qu'ils auraient pu être réalisés *in situ* par l'hydromètre en termes de nombre et de répartition latérale des verticales selon les bonnes pratiques de l'hydrométrie. Pour chaque jaugeage de référence et pour chaque nombre de verticales, 1000 jaugeages probables sont ainsi générés.

Les verticales proches des berges sont systématiquement sélectionnées de manière à réduire le poids des extrapolations. Ensuite, les verticales sont sélectionnées de manière à cerner les zones de fort gradient de débit unitaire et à obtenir des débits de sous-sections équivalents (distribution homogène des verticales sur la largeur du cours d'eau).

III.4. Analyse statistique

En supposant que le jaugeage de référence donne la valeur vraie du débit, on peut représenter l'erreur relative de chacun des jaugeages sous-échantillonnés, notée E_j et estimée selon l'équation (4), en fonction de son indice de qualité d'échantillonnage SQI comme illustré à la figure 3.

$$E_j = \frac{Q_j - Q_m}{Q_m} [\%], \quad (4)$$

L'estimation des quantiles empiriques 15 et 85 % ainsi que de la médiane (figure 3) permettent d'estimer le terme u'_m (au niveau de confiance de 68 %) comme fonction de SQI . Un modèle d'incertitude moyen, représenté par la figure 4, est donc obtenu. Un polynôme du second degré peut être ajusté. Celui-ci est exprimé par l'équation (5) et représenté par la courbe rouge à la figure 4.

$$u'_m = -5,9SQI^2 + 21,4SQI + 0,3 [\%], \quad (5)$$

IV. RÉSULTATS

L'utilisation de la courbe illustrée à la figure 4 permet, par le simple calcul du SQI du jaugeage considéré, de déduire u'_m . Les autres termes peuvent être calculés en utilisant les valeurs proposées par la norme ISO 748. Il est néanmoins conseillé d'appliquer la méthodologie Q+ pour l'estimation de l'incertitude du terme $u_p(V)$ et, dans la mesure du possible, d'utiliser les résultats d'étalonnage adapté au matériel de mesure utilisé et des incertitudes estimées en fonction des conditions des essais.

A titre d'exemples, les jaugeages du Lot à la station hydrométrique de Bramonas (10 verticales) et du Gave à la station hydrométrique d'Arras Nouaux (11 verticales) donnent respectivement des incertitudes 3,4 % et 15 % au seuil de confiance de 95 %. Cette différence s'explique par la forte variabilité des débits unitaires pour le jaugeage du Gave (voir la figure 1). A l'inverse, le profil latéral des débits unitaires du jaugeage du Lot est relativement lisse et son échantillonnage est suffisamment dense et homogène pour bien le caractériser.

Les quatre méthodes analytiques ont été appliquées à une base de 3930 jaugeages EDF-DTG et les résultats sont présentés sous forme de distributions empiriques à la figure 5. Les valeurs d'incertitude selon la norme ISO 748 et la méthode Flaure sont représentées en fonction du nombre de verticales à la figure 6. On observe des résultats d'incertitude selon la méthode Flaure plus contrastés que les résultats d'incertitude estimés par la norme ISO 748 qui dépendent

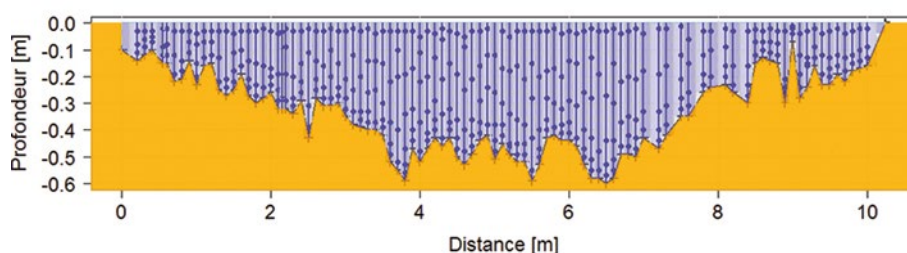


Fig. 2 : Profil bathymétrique et localisation des points de mesure de vitesses du jaugeage de la Souloise à l'Infernet (95 verticales).

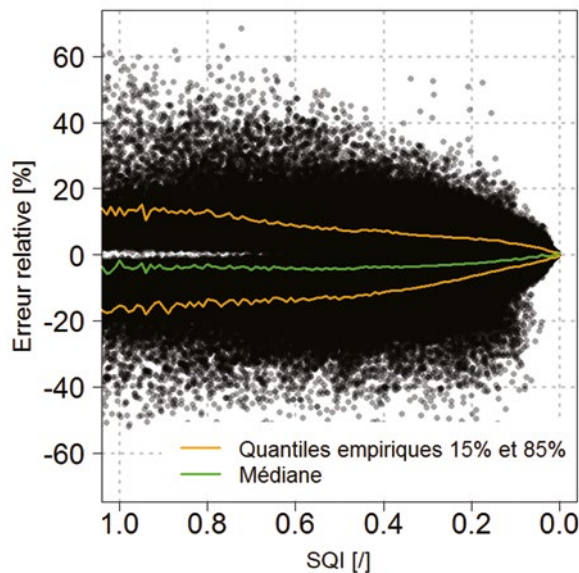


Fig. 3 : Distribution des erreurs relatives en fonction du SQI pour l'ensemble des jaugages sous-échantillonnés (issus des 53 jaugages de référence) et quantiles empiriques 15 et 85 % associés (en orange). La médiane est représentée en vert.

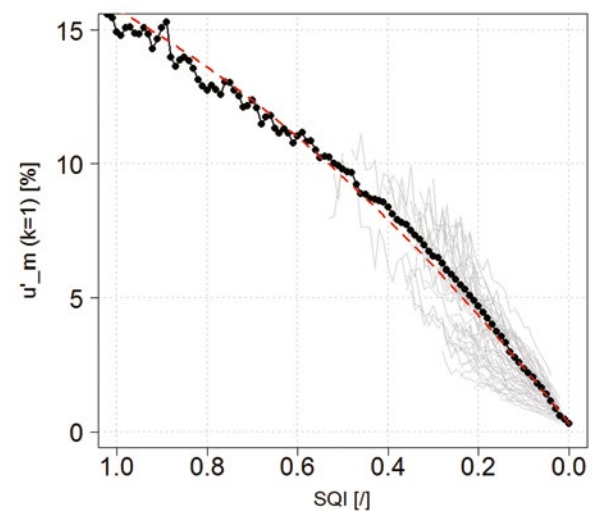


Fig. 4 : Modèle moyen d'incertitude dû à l'échantillonnage latéral de la bathymétrie et du profil des vitesses moyennes en fonction de l'indice de qualité d'échantillonnage (SQI). La courbe en rouge représente l'ajustement d'un polynôme de second degré. Le faisceau de courbes grises représente le modèle d'incertitude associé à chacun des 53 jaugages de référence.

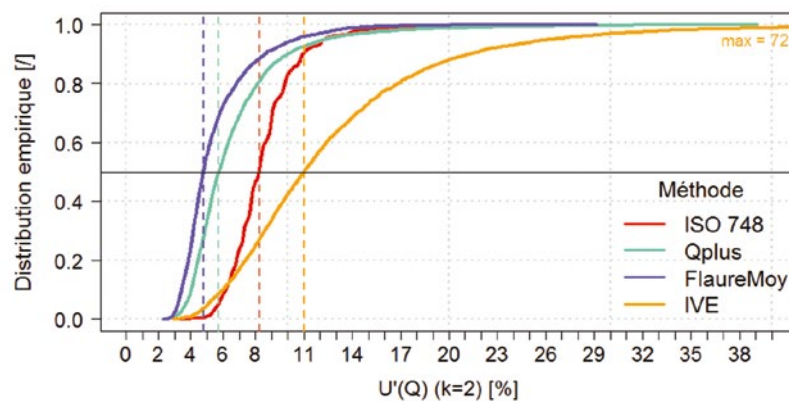


Fig. 5 : Incertitudes élargies $U'(Q)$ (au niveau de confiance de 95 %) selon les quatre méthodes analytiques appliquées à une base de 3930 jaugages EDF-DTG présentées sous forme de distributions empiriques. Les lignes verticales colorées sont les valeurs médianes d'incertitude selon les différentes méthodes. La valeur maximale d'incertitude (72 %) est atteinte en appliquant la méthode IVE.

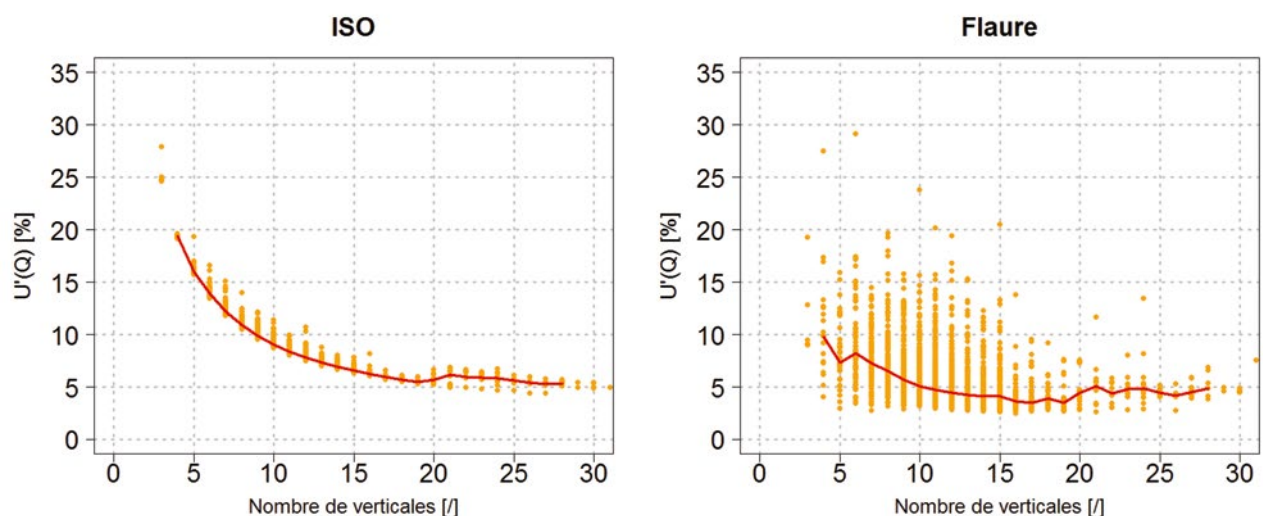


Fig. 6 : Comparaison des incertitudes élargies $U'(Q)$, au niveau de confiance de 95 %, estimées selon le calcul de la norme ISO 748 (à gauche) et selon la méthode FLAURE (à droite) pour 3930 jaugages, en fonction du nombre de verticales. La courbe rouge représente la médiane.

uniquement du nombre de verticales réalisées. Les valeurs d'incertitude obtenues avec la méthode Flaure sont cohérentes avec l'expertise. La charte qualité de l'hydrométrie [Forray, 1998] suggère en effet que «80 % des jaugeages sont réalisés à mieux que 6 %» d'incertitude. Le *SQI* semble donc être un indicateur objectif, plus pertinent que le nombre de verticales, pour la quantification de l'incertitude due à l'échantillonnage latéral de la bathymétrie et des vitesses moyennes. La méthode Flaure donne des résultats proches des valeurs estimées selon la méthode *Q+* en considérant un angle α fixe de 10°. Enfin la méthode IVE donne des valeurs d'incertitude plus élevées, qui semblent supérieures à ce que l'expertise usuelle considère comme réaliste.

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La méthode Flaure, établie pour améliorer les méthodes existantes (ISO 748, *Q+*, IVE), propose une estimation du terme u'_m fondée sur un indicateur objectif nouveau (indice *SQI*) et l'étude d'un jeu de jaugeages de référence variés. Les valeurs d'incertitude produites semblent être en adéquation avec l'expertise. Néanmoins, l'absence de valeur de référence en termes de débit et la confrontation avec des essais inter-laboratoires [Despax *et al.*, 2016b] n'ont, à ce jour, pas permis de statuer sur la méthode permettant d'estimer au mieux l'incertitude des jaugeages au courantmètre.

Le calcul du *SQI* repose sur l'hypothèse d'un échantillonnage suffisant permettant d'évaluer les principales caractéristiques de la section de mesure. Le retrait d'une verticale peut, dans certains cas, conduire à une réduction de la valeur du *SQI* et donc biaiser l'estimation de l'incertitude. De plus, on observe à la figure 4 une dispersion des courbes d'incertitude pour les différents jaugeages de référence utilisés. Cette dispersion s'explique par la variété des jaugeages de référence en termes de morphologie et de complexité du champ des vitesses [Despax, 2016]. Des travaux complémentaires devront être menés afin d'améliorer la consistance de cet indicateur d'échantillonnage et ainsi réduire l'incertitude associée à l'utilisation du modèle moyen (l'incertitude pouvant être représentée à la figure 4 par le faisceau grisé de courbes).

Les bénéfices apportés par l'ajout de verticales intercalaires de mesure de profondeur (ou « méthode japonaise ») peuvent être évalués en décomposant le terme u'_m en $u'_m(D_i)$ et $u'_m(V_i)$, respectivement l'incertitude sur la bathymétrie et l'incertitude liée à l'intégration latérale du profil de vitesses. Pour cela, le *SQI* peut être estimé en substituant q_i respectivement par D_i et V_i tel que présenté par Despax [2016].

Cette étude constitue une contribution utile pour la révision des normes internationales relatives au mesurage des débits des cours d'eau. Elle porte sur un terme souvent prépondérant dans le calcul de l'incertitude. Néanmoins, d'autres termes susceptibles d'être non négligeables dans l'incertitude finale et jusqu'alors omis mériteraient d'être quantifiés tels que l'incertitude due au choix de la section de mesure, l'incertitude due aux erreurs systématiques sur l'intégration verticale des vitesses, l'incertitude liée aux variations de débit, l'incertitude de position et d'orientation des instruments ou encore celle liée à l'opérateur (soin apporté à la mesure, expérience, stress). De nouveaux essais inter-laboratoires avec un protocole bien définis devraient être en mesure de répondre à ces questions.

Enfin, cette méthode peut être transposée aux techniques de mesure de débit par radar de surface (ou SVR) [Dramais *et al.*, 2013], [Welber *et al.*, 2016] puisqu'elles reposent sur l'exploration partielle du champ des vitesses à condition de

prendre en compte l'incertitude liée à la bathymétrie et à l'utilisation d'un coefficient de surface pour l'estimation de la vitesse moyenne.

VI. RÉFÉRENCES

- CARTER, R. W. ET ANDERSON, I. E. (1963) – Accuracy of current meter measurements. *Journal of the Hydraulics Division*, **4**(1), 105–115.
- COHN, T., KIANG, J. ET MASON, R. (2013) – Estimating discharge measurement uncertainty using the interpolated variance estimator. *Journal of Hydraulic Engineering*, **139**(5), 502–510.
- DESPAX (2016) – Incertitude des mesures de débit des cours d'eau au courantmètre. Amélioration des méthodes analytiques et apports des essais interlaboratoires. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes, 273 p.
- DESPAX, A., PERRET, C., GARÇON, R., HAUET, A., BELLEVILLE, A., LE COZ, J. ET FAVRE, A.-C. (2016a) – Considering sampling strategy and cross-section complexity for estimating the uncertainty of discharge measurements using the velocity-area method. *Journal of Hydrology*, **533**, 128–140.
- DESPAX, A., FAVRE, A.-C., BELLEVILLE, A., HAUET, A., LE COZ, J., DRAMAIS, G. ET BLANQUART, B. (2016b) – Field inter-laboratory experiments versus propagation methods for quantifying uncertainty in discharge measurements using the velocity-area method. *Proceeding of River Flow 2016*, Saint-Louis, USA. 7 p.
- DRAMAIS, G., LE COZ, J., LE BOURSICAUD, R., HAUET, A., LAGOUY, M. (2013) – Jaugeage par radar mobile : protocole et résultats. *Colloque Hydrométrie 2013*, Paris. 8 p.
- FORRAY, N., AUER, J. C., BROCHOT, J. F., ERAUD, Y., FAVRIAU, A., GHIO, M., LALLEMENT, C., LANG, M., ODIER, M. ET SCHERER, C. (1998) – Charte qualité de l'hydrométrie. Code de bonnes pratiques, 50 p.
- HERSCHY, R. W. (1975) – The accuracy of existing and new methods of river gauging. Thèse de doctorat, *University of Reading*, 485 p.
- HERSCHY, R. W. (1993) – The velocity-area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, **4**(1), 7–10.
- HERSCHY, R. W. (2002) – The uncertainty in a current meter measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, **13**, 281–284.
- ISO (2007) – ISO/TS 25377:2007. Hydrometry: Hydrometric Uncertainty Guidance (HUG), 59 p.
- ISO (2009) – ISO 748:2009. Hydrometry: measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats, 58 p.
- JCGM (2008) – Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. Guide 100, BIPM, 132 p.
- KIANG, J., COHN, T. ET MASON, R. (2009) – Quantifying uncertainty in discharge measurements: A new approach. In *World Environmental and Water Resources Congress 2009. American Society of Civil Engineers*. 8 p.
- LE COZ, J., CAMENEN, B., PEYRARD, X. ET DRAMAIS, G. (2012) – Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, **26**, 18–29.
- LE COZ, J., BECHON, P. M., CAMENEN, B., & DRAMAIS, G. (2014) – Quantification des incertitudes sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses. *La Houille Blanche*, **5**, 31–39.
- WELBER, M., LE COZ, J., LARONNE, J. B., ZOLEZZI, G., ZAMLER, D., DRAMAIS, G., HAUET, A. ET SALVARO, M. (2016) – Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resources Research*, **52**, 1108–1126.