

Résumé :

La connaissance des débits constitue un enjeu important pour les gestionnaires, particulièrement en période de crue et d'étiage. Des réseaux de surveillance hydrométrique ont été développés par les services de l'Etat, producteurs d'électricité, syndicats de rivière, etc. La plupart des stations de mesure de débit installées sur des cours d'eau naturels mesurent les débits de manière indirecte en transformant des mesures de hauteur d'eau en débits à l'aide de courbes de tarage établies à partir d'un nombre limité de mesures ponctuelles (jaugeages). Une méthodologie a été développée pour quantifier l'incertitude sur les débits résultant de l'emploi des courbes de tarage. Pour une station donnée, cette méthode utilise le cadre statistique de l'inférence bayésienne pour caler une courbe de tarage et estimer son incertitude, en fonction des incertitudes individuelles de chaque jaugeage et de l'analyse hydraulique de cette station. Cette méthode a été appliquée sur plusieurs stations du bassin versant péri-urbain de l'Yzeron (site OTHU). Cela a également permis de cibler les plages de hauteur d'eau qui sont encore à améliorer par des jaugeages complémentaires.

■ **Cadre Général :**

Les mesures de débit en continu sont des données de base indispensables pour les études hydrologiques en milieu urbain et péri-urbain, qu'elles s'intéressent aux inondations, aux étiages ou à l'estimation des flux de polluants arrivant aux milieux récepteurs. La plupart des stations de mesure de débit installées sur des cours d'eau naturels, mais aussi dans certains cas dans les réseaux d'eaux pluviales ou usées, mesurent les débits à l'aide d'une loi de transformation hauteur – débit appelée aussi courbe de tarage. Un limnimètre mesure et enregistre en continu le niveau d'eau dans le cours d'eau ou la conduite.

Cette hauteur d'eau est ensuite convertie en débit. Les courbes de tarage sont généralement établies au moyen de mesures ponctuelles appelées jaugeages. En fonction du nombre de ces jaugeages, de leur incertitude, de la gamme de débit dans laquelle ils sont situés, et de la configuration des stations, les lois de transformation peuvent être assez incertaines, surtout dans les gammes de débit très hautes (crues) et très basses (étiages). Il est donc particulièrement important de quantifier les incertitudes sur les courbes de tarage pour avoir des estimations des incertitudes sur les débits instantanés, et par là pouvoir encadrer l'utilisation de ces données pour les études hydrologiques

■ **Objectifs:**

Le Guide GUM (JCGM, 2008) pour l'expression des incertitudes sur les mesures considère que les valeurs possibles d'une grandeur suivent une distribution statistique autour de la valeur mesurée. L'incertitude, dite incertitude élargie U , correspond à l'intervalle dans lequel on s'attend à ce qu'une fraction élevée des valeurs se situe (typiquement niveau de confiance à 95%).

En reprenant et en modifiant la formulation établie par Olivier et al. (2008), on peut estimer l'incertitude totale sur le débit instantané mesuré Q comme la combinaison de trois termes :

- l'incertitude sur la loi $Q(h)$ établie pour des conditions qui correspondent à un régime de référence ; c'est l'incertitude sur la courbe de tarage proprement dite ;
- incertitude due à l'écart aux conditions de référence. Ce terme regroupe l'incertitude liée aux modifications de l'hydraulique du cours d'eau, par changement de forme du lit (érosion, dépôt, végétation saisonnière), ou par des effets transitoires (hystérésis en montée de crue) ;
- l'incertitude issue de la propagation de l'incertitude de mesure du niveau d'eau.

L'objectif de la présente fiche technique est de proposer une méthodologie d'estimation du premier terme, c'est-à-dire l'incertitude sur la courbe de tarage.

■ **Contacts :**

Flora BRANGER, Jérôme LE COZ, Benjamin RENARD, Laurent BONNIFAIT, Cemagref / Irstea, UR HHLY, 3bis Quai Chauveau, CP 220, 69336 Lyon Cedex 9. Tel : 04 72 20 89 24.

Email : flora.branger@irstea.fr

■ Les avancées de l'OTHU : Principaux résultats

PRINCIPES

Une courbe de tarage est établie en réalisant des jaugeages, qui sont des couples de points (h, Q) à un instant donné. Plusieurs techniques de jaugeages existent (exploration du champ des vitesses par courantomètre, profileur Doppler ADCP, volumétrie, dilution,...). Ensuite, on cale une courbe entre ces jaugeages (classiquement par régression), de façon à obtenir soit une équation, soit un tableau de correspondances $h \rightarrow Q$ qui permette, pour chaque valeur de hauteur d'eau, d'obtenir une valeur de débit. Pour une gamme de hauteur d'eau homogène, l'équation hydraulique classique est une loi puissance de la forme $Q=a(h-b)^c$ où h est la hauteur d'eau et Q le débit, a , b et c des paramètres à caler.

Les sources d'incertitude sont multiples :

- tout d'abord, chaque jaugeage est entaché d'une incertitude, qui dépend de la technique employée mais aussi des conditions opérationnelles du jaugeage (Le Coz et al., 2011). Par exemple, pour un jaugeage par exploration du champ des vitesses, cette incertitude dépend du nombre de verticales et du nombre de points de mesure de vitesse par verticale (Figure 1). Des ordres de grandeur typiques pour des jaugeages réalisés dans les bonnes conditions d'application sont des incertitudes élargies de 5 à 10% ;
- ensuite, lorsqu'on cale une courbe passant par plusieurs points, on réalise nécessairement une approximation. Le procédé de calage de la courbe lui-même est donc incertain ;
- enfin, le problème de l'extrapolation se pose pour les faibles et forts débits. En effet, en général les jaugeages sont réalisés pour la gamme de moyennes eaux, mais pas lors des crues car il peut y avoir indisponibilité ou danger pour les opérateurs et rarement lors des étiages sévères car beaucoup de méthodes de jaugeage sont impraticables lorsqu'il n'y a pas assez d'eau. La courbe doit donc être extrapolée en-dehors de la gamme jaugée, en prolongeant la courbe calée, sans qu'on sache précisément dans quelle mesure cette prolongation est valide ou non.

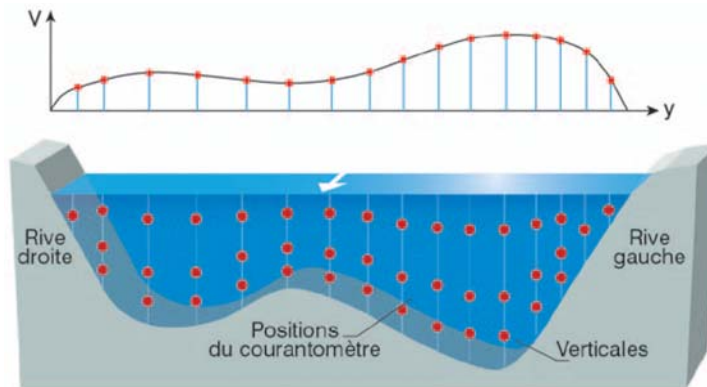


Figure 1 : schéma-type d'une section en travers de cours d'eau et des points de mesure lors d'un jaugeage par exploration du champ des vitesses. Plus il y a de verticales et de points de mesure par verticale, plus l'échantillonnage est dense et donc mieux le débit est connu. Son incertitude est donc plus faible.

La méthodologie développée, appelée BaRatin, permet à la fois d'établir la courbe de tarage et de calculer l'incertitude associée. Elle s'appuie sur le cadre mathématique de l'inférence bayésienne, qui permet à la fois :

- de prendre en compte individuellement l'incertitude de chaque jaugeage dans le calage de la courbe (à la différence des méthodes de régression classiques) ;
- d'intégrer au calage de la courbe l'expertise du gestionnaire sur le fonctionnement de la station. Cette expertise consiste notamment à analyser le fonctionnement hydraulique du cours d'eau aux environs de la station, et à déterminer s'il y a des ouvrages naturels ou artificiels (seuils) contrôlant l'écoulement et pour quelles gammes de hauteur d'eau ils ont une influence. La Figure 2 représente deux modes différents de contrôle de l'écoulement dits contrôles hydrauliques, soit par le lit et les berges de la rivière (Figure 2a, on parle de contrôle par le chenal), soit par un ouvrage ou un radier naturel (Figure 2b, contrôle par la section). L'avantage d'introduire cette expertise est par exemple de pouvoir avoir une idée de comment va se comporter la rivière, même en-dehors de la plage de débits jaugés, et donc de faire une meilleure extrapolation ;
- de calculer l'incertitude de la courbe de tarage de façon intégrée, en même temps que le calage.

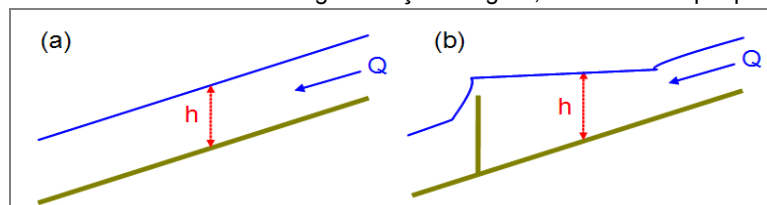


Figure 2 : contrôle hydraulique par chenal (a) ou par seuil (b) le long d'un profil idéalisé.

UTILISATION PRATIQUE

La mise en pratique de cette méthodologie consiste, pour une station donnée, à :

1. Faire la liste des jaugeages disponibles et estimer leur incertitude individuelle.
Le calcul de l'incertitude est standardisé par la norme ISO748 pour les courantomètres, et d'autres normes pour les autres techniques de mesure. Le logiciel Q+ du Cemagref (Le Coz et al., 2012) généralise et implémente cette méthode. On peut aussi s'appuyer sur des guides méthodologiques (Le Coz et al, 2011).
2. Faire l'analyse du fonctionnement hydraulique du site de la station.
En fonction des contrôles hydrauliques identifiés, on pourra déterminer la forme des lois de courbe de tarage auxquelles on peut s'attendre, à l'aide des lois d'ouvrage classiques répertoriées dans les manuels d'hydraulique, et des caractéristiques physiques de la rivière (largeur du lit, hauteur des seuils, rugosité du fond, présence ou non de végétation...). L'expertise peut également être confortée par une modélisation numérique (le plus souvent 1D, voire 2D/3D en cas d'écoulement complexe).
3. Lancer le simulateur mathématique BaRatin, de façon à obtenir :
 - la courbe de tarage calée ;
 - une quantification de l'incertitude sur cette courbe calée, sous forme de distribution ou d'intervalle à un niveau de confiance donné (usuellement 95%).

Par ailleurs, la méthode ne peut s'appliquer de façon pertinente que lorsque des mesures in situ (jaugeages) sont disponibles pour chaque gamme de contrôle hydraulique. Il est souhaitable de disposer d'au moins 3 à 6 jaugeages pour chaque gamme de contrôle hydraulique identifiée, sachant que bien entendu la méthode sera d'autant plus fiable que les jaugeages seront nombreux et bien répartis

APPLICATION SUR LE BASSIN VERSANT DE L'YZERON

Cette méthode a été appliquée sur plusieurs stations du site OTHU bassin versant de l'Yzeron, situé dans l'ouest lyonnais. Sont présentés ici à titre d'exemple les résultats sur la station de la Léchère sur la rivière Chaudanne (~2 à 4 km²), et sur la station du Charbonnières (~23 km²). Ces stations ont des configurations contrastées, avec un canal jaugeur Parshall calibré avec 10 jaugeages disponibles pour la station de la Léchère (Figure 3), et un double seuil (déversoir triangulaire puis seuil rectangulaire épais) et 16 jaugeages disponibles pour la station du Charbonnières (Figure 4).

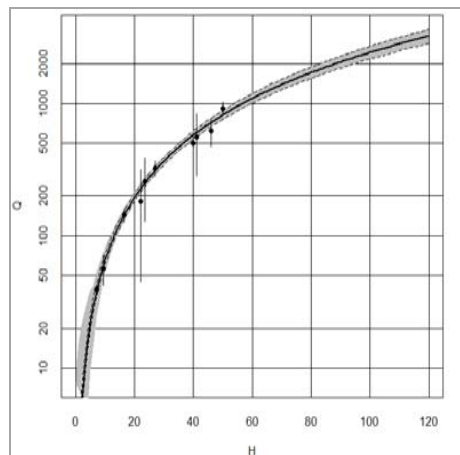


Figure 3 :

Station de la Léchère sur la rivière Chaudanne (a) et courbe de tarage estimée en échelle semi-logarithmique (b). Les hauteurs sont en cm et les débits en L/s. En gris l'incertitude sur la courbe représentée par un intervalle de confiance à 95%. Les points sont les jaugeages représentés avec leurs incertitudes respectives

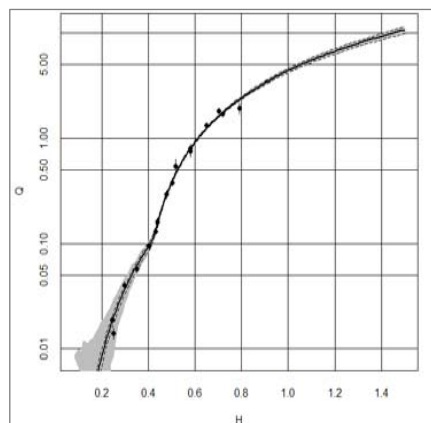


Figure 4 :

Station de la rivière Charbonnières à Charbonnières-les-bains (a) et courbe de tarage estimée en échelle logarithmique (b). Les hauteurs sont en m et les débits en m³/s. En gris l'incertitude sur la courbe représentée par un intervalle de confiance à 95%. Les points sont les jaugeages représentés avec leurs incertitudes respectives.

■ Cadre d'utilisation

Cette méthode est potentiellement utilisable pour tous les gestionnaires de stations hydrométriques, par exemple les services de prévention des crues, les DREAL, les producteurs d'électricité, les collectivités territoriales en charge de réseaux de surveillance. Ceux-ci peuvent avoir intérêt à connaître les incertitudes sur les débits qu'ils produisent, pour mieux préciser les seuils de mise en alerte (crues et étiages), ou quantifier les flux de polluants. La méthode s'applique bien sur aux cours d'eau naturels, mais peut aussi être appliquée pour des mesures en conduite (hors mise en charge). Elle n'est par ailleurs pas limitée aux seuls petits cours d'eau des bassins urbains et péri-urbains. Elle est actuellement en cours d'application sur plusieurs rivières françaises (Ardèche, Alsace...) sur des bassins jusqu'à 2000 km², et est actuellement en cours de transfert vers les services opérationnels (SPC et DREAL).

Il faut néanmoins préciser que dans son état actuel, la méthode est construite pour le cas de courbes de tarage simples $Q(h)$, croissantes et univoques. Des relations plus complexes faisant intervenir d'autres variables que la hauteur d'eau pour tenir compte par exemple d'une influence aval (barrage, marée...) ou de la mise ne charge d'une conduite, ne sont pas traitées ici.

■ Développements futurs

Le travail sera poursuivi dans trois directions pour améliorer la méthode. La première est l'amélioration du calcul des incertitudes individuelles sur les jaugeages, notamment pour les petits cours d'eau. Notamment, une difficulté rencontrée sur l'Yzeron est l'effet de l'intrusion de l'appareil dans des faibles tirants d'eau à bas débit. Une autre source d'incertitude importante sur l'Yzeron sont les variations de débit au cours du jaugeage, fréquentes car les dynamiques de crues sont extrêmement rapides.

Le second axe de travail est l'estimation de l'incertitude d'écart aux conditions de référence, liée aux modifications de l'hydraulique du cours d'eau (détarages), et aux effets transitoires. Il s'agit de la composante la plus difficile à évaluer, et doit nécessairement être appréciée au cas par cas. Dans le cas d'un détarage, il peut ne pas y avoir d'autre solution que le changement de courbe de tarage.

Enfin, on travaillera aussi sur l'automatisation de l'ensemble de la chaîne de calcul des incertitudes sur les débits instantanés, en propageant également l'incertitude sur la mesure de hauteur d'eau, de façon à obtenir de façon automatique l'incertitude associée à chaque valeur d'un hydrogramme.

■ Documents publiés

- GUM (2008) Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, JCGM (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP et OIML), 121 p., téléchargeable à l'adresse: <http://www.bipm.org/fr/publications/guides/gum.html>
- NF EN ISO 748:2009, Hydrométrie – Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de débitmètres ou de flotteurs 47 p.
- Bonnifait L., Renard, B., Le Coz, J. (2011) Analyse des courbes de tarage de 7 stations hydrométriques de la DREAL Alsace, 170 p.
- Branger, F.; Renard, B.; Le Coz, J., Bonnifait L. (2011). Assessment of uncertainty of stage-discharge relations through hydraulic and bayesian approach, 5th International Conference on Flood Management (ICFM5), 27-29 September 2011, Tokyo, Japan.
- Le Coz, J., B. Camenen, G. Dramais, M. Ferry, J.-L. Rosique, J. Ribot-Bruno (2011). Guide pratique pour le contrôle des débits réglementaires, Onema/Cemagref, 174 p.
- Le Coz, J., B. Camenen, X. Peyrard, G. Dramais (2012). Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method, soumis à Flow Measurement and Instrumentation.
- Olivier, O., G. Pierrefeu, M. Scotti, and Blanquart B. (2008). Incertitudes sur les débits issus des courbes de tarage, conférence SHF « Mesures hydrologiques et incertitudes ».
- Renard, B., Garreta, V., Lang, M. (2006). An application of Bayesian analysis and Markov chain Monte Carlo methods to the estimation of a regional trend in annual maxima, Water Resources Research, 42, W12422.