

DEVELOPPEMENT D'OUTILS POUR LA QUANTIFICATION DES INCERTITUDES DES DONNEES HYDROMETRIQUES

Developing tools for quantifying streamflow data uncertainty

Auteurs : LE COZ Jérôme^{1*}, RENARD Benjamin², LANG Michel¹, CALMEL Blaise¹, MENDEZ-RIOS Felipe¹, HAUET Alexandre³, DESPAX Aurélien⁴, PERRET Emeline⁴, BONNIFAIT Laurent⁵

* *auteur correspondant*

¹INRAE, UR RiverLy, Villeurbanne, France, jerome.lecoz@inrae.fr

²INRAE, UMR RECOVER, Aix-en-Provence, France, benjamin.renard@inrae.fr

³EDF DTG, Grenoble, France, alexandre.hauet@edf.fr

⁴CNR, CACOH, Lyon, France, a.despax@cnr.tm.fr

⁵Cerema, DTerMed/DRN/RIL, Aix en Provence, France, laurent.bonnifait@cerema.fr

Choix du thème/session :

2/ Prévision des crues et des inondations

Résumé

La quantification des incertitudes des données hydrométriques (mesure de débit des cours d'eau) est reconnue comme indispensable mais sa mise en œuvre pratique nécessite un ensemble d'outils adaptés au traitement des mesures sur l'ensemble d'une chaîne complexe allant des mesures de terrain (jaugeages, limnigrammes) aux hydrogrammes, en passant par les courbes de tarage. Nous présentons plusieurs méthodes et outils logiciels développés ces vingt dernières années et intégrés dans les pratiques des hydromètres en France. L'incertitude plus forte des débits de crue est un des défis à relever. Outre la poursuite des développements méthodologiques, une réflexion sur la communication et la bancarisation des incertitudes est à entreprendre.

Mots clefs :

Hydrométrie, Incertitudes, Débit.

Abstract

Quantifying the uncertainty of hydrometric data (river discharge measurements) is recognised as essential, but in practice it requires a set of tools adapted to the processing of measurements throughout a complex workflow ranging from field measurements (streamgaugings, stage records) to rating curves and discharge time series. We present several methods and software tools that have been developed over the last twenty years and integrated into the practices of field hydrologists in France. The greater uncertainty of flood discharges is one of the challenges. In addition to continuing methodological developments, there is a need to consider how to best communicate and archive the uncertainties.

Key words:

Hydrometry, Uncertainty, Discharge.

1. Introduction

Le débit des cours d’eau est sans doute la donnée la plus informative en hydrologie, et une des plus utiles pour la modélisation et la prévision des crues et des inondations. En tant que résultats de mesure, les données de débit comportent des erreurs qui doivent être corrigées (si elles peuvent être détectées et quantifiées) ou estimées en tant qu’incertitudes (dans le cas contraire). Les erreurs peuvent apparaître à toutes les étapes du processus de production des données hydrométriques, des mesures sur le terrain jusqu’à la publication et la bancarisation des données. Formation, bonnes pratiques, normalisation, et assurance et contrôle qualité sont nécessaires pour éviter, détecter et corriger ces erreurs.

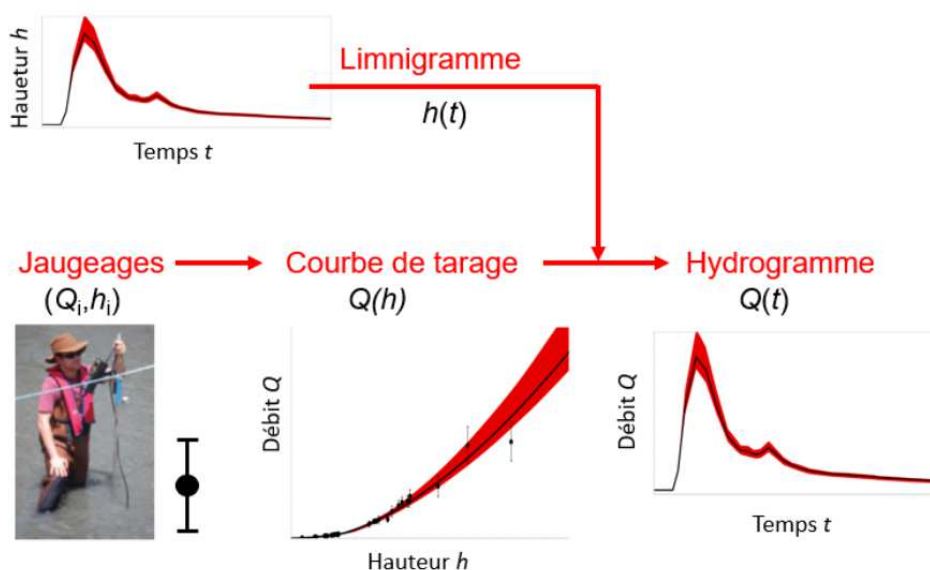


Figure 1 : Workflow le plus courant pour la production de données hydrométriques, avec incertitudes quantifiées à chaque étape (la photo de jaugeur n’est pas contractuelle)

Au cours des dernières décennies, des efforts de recherche internationaux ont été consacrés au développement de méthodes pour quantifier l’incertitude des jaugeages (mesures ponctuelles du débit des cours d’eau) et celle des relations hauteur-débit (ou courbes de tarage) calées avec ces jaugeages et utilisées pour établir les séries temporelles de débit (hydrogrammes) de la plupart des stations hydrométriques, selon la chaîne de traitement présentée sur la Figure 1. Nous présentons différents outils opérationnels développés en France (via le Groupe Doppler Hydrométrie, GDH, constitué en 2005, et la section Hydrométrie de la SHF) et en collaboration internationale pour quantifier l’incertitude hydrométrique. D’une part, deux approches complémentaires pour estimer l’incertitude des jaugeages : méthodes de propagation adaptées à différentes techniques de mesure et méthode des essais interlaboratoires. D’autre part, l’approche bayésienne BaRatin pour estimer l’incertitude des courbes de tarage et des hydrogrammes. Le cas particulier des mesures en crue est discuté ensuite.

2. Incertitude des jaugeages calculée par méthode de propagation

En métrologie, la méthode de propagation des incertitudes définie par le GUM, guide pour l’expression de l’incertitude de mesure (JCGM, 2008a), est la méthode de référence pour le calcul des incertitudes de mesure. Les principales étapes de la méthode sont l’identification des sources d’erreur, l’écriture du modèle de mesure (« Data Reduction Equation », qui en réalité est plutôt un modèle d’erreur),

l'estimation des composantes d'incertitude (entrées du modèle et différentes sources d'erreur), et la propagation de ces incertitudes via un développement limité d'ordre 1 selon la formule suivante :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (\text{Eq. 1})$$

avec $u_c(y)$ l'incertitude-type combinée (ou finale) sur le résultat de mesure $y = f(x_1, \dots, x_n)$ calculé selon le modèle de mesure f avec les n grandeurs d'entrée x_i , d'incertitude-type $u(x_i)$. A noter qu'une propagation par Monte Carlo ou encore l'inférence bayésienne sont des méthodes d'estimation alternatives prévues par des suppléments du GUM.

Son application aux mesures de débit en cours d'eau (jaugeages) est proposée par différents manuels, articles scientifiques et documents normatifs, notamment le HUG, guide pour l'expression de l'incertitude en hydrométrie (ISO/TS 25377, 2007). Cependant, son application opérationnelle pose un certain nombre de problèmes qui expliquent en partie que pendant des décennies, les services hydrométriques ne disposaient souvent pas d'un calcul d'incertitude pour leurs jaugages. D'abord, l'application directe des principes du GUM n'est pas suffisante pour établir l'incertitude d'un jaugage car certaines sources d'erreur importantes et très variables échappent à la modélisation, en particulier les erreurs environnementales (liées aux conditions de mesure sur le terrain), les interpolations et extrapolations de mesure (nécessaires au calcul du débit sur toute la section), et les effets opérateurs (procédure de jaugage, qualité du déploiement, paramétrages, etc.). Ces composantes d'incertitude doivent être estimées ou modélisées, car elles ne découlent pas directement du modèle de mesure (« Data Reduction Equation » du GUM). Il est également nécessaire de prendre en considération certains biais, ou erreurs systématiques à l'échelle du jaugage élémentaire (transect ADCP, injection de traceur...) voire à l'échelle de mesures successives (auquel cas l'incertitude ne se réduit pas par la moyenne des résultats). Enfin, les diverses techniques de jaugage étant très différentes, elles appellent des méthodes de propagation d'incertitude adaptées, qui doivent être implémentées dans des outils logiciels pratiques et conviviaux (idéalement, les mêmes logiciels que ceux utilisés pour vérifier les mesures et calculer le débit du jaugage).

La décennie écoulée a vu le développement de nouvelles méthodes de calcul des incertitudes de jaugage répondant à ces critères, en particulier au sein du GDH. Comme la méthode IVE développée par l'USGS (Cohn *et al.*, 2013), les méthodes Q+ (Le Coz *et al.*, 2012) et Flaure (Despax *et al.*, 2016) ont été successivement proposées pour améliorer le calcul de l'incertitude des jaugages par exploration du champ des vitesses (moulinets, courantomètres, jaugages de surface). Ces trois méthodes reprennent le cadre du calcul d'incertitudes de la norme ISO748, mais proposent des calculs plus explicites et directs des composantes d'incertitude dues à l'intégration verticale des vitesses et à l'intégration latérale (et l'extrapolation aux rives) des débits par unité de largeur. En France, la méthode Q+ a été implémentée dans le logiciel Barème (réseau hydrométrique d'Etat) et la méthode Flaure dans le logiciel Jasmine (EDF), tous deux utilisés opérationnellement pour le dépouillement et la gestion des jaugages des services hydrométriques.

Plusieurs méthodes de calcul des incertitudes ont également été proposées ces dernières années pour les jaugages par ADCP (profileur hydro-acoustique de courant à effet Doppler) mobiles¹, notamment le cadre général posé par González-Castro et Muste (2007) et les méthodes RiverFlowUA (González-Castro *et al.*, 2016), QUant (Moore *et al.*, 2016 ; Díaz Lozada *et al.*, 2023), QRev-UA (Mueller, 2016) et Oursin (Despax *et al.*, 2023). Cette dernière méthode, développée par des membres du GDH, a été récemment implémentée dans le logiciel QRevInt (cf. Figure 2), dans le cadre de la participation française au développement de ce logiciel international. Cela permet de bénéficier, au sein d'un même

¹ C'est-à-dire, déploiement par transect avec référence de vitesse de déplacement (*bottom-tracking* ou GPS)

logiciel libre et largement utilisé, du post-traitement, de l’analyse qualité et de l’analyse d’incertitude des données de quasiment tous les instruments du commerce utilisés en hydrométrie. Egalement basée sur les principes généraux du GUM, la méthode Oursin évalue les incertitudes des débits extrapolés (dans les zones non mesurées au fond, en surface et aux rives) à partir d’une analyse de sensibilité aux paramètres de ces débits, sur la base d’un jeu de scénarios expertisés. Pour un débit jaugé établi comme la moyenne des débits de transects successifs, l’incertitude est calculée en distinguant les erreurs indépendantes d’un transect à l’autre et les erreurs au contraire systématiques. En effet, l’incertitude associée aux premières se réduit dans la moyenne, contrairement à l’incertitude associée aux secondes.

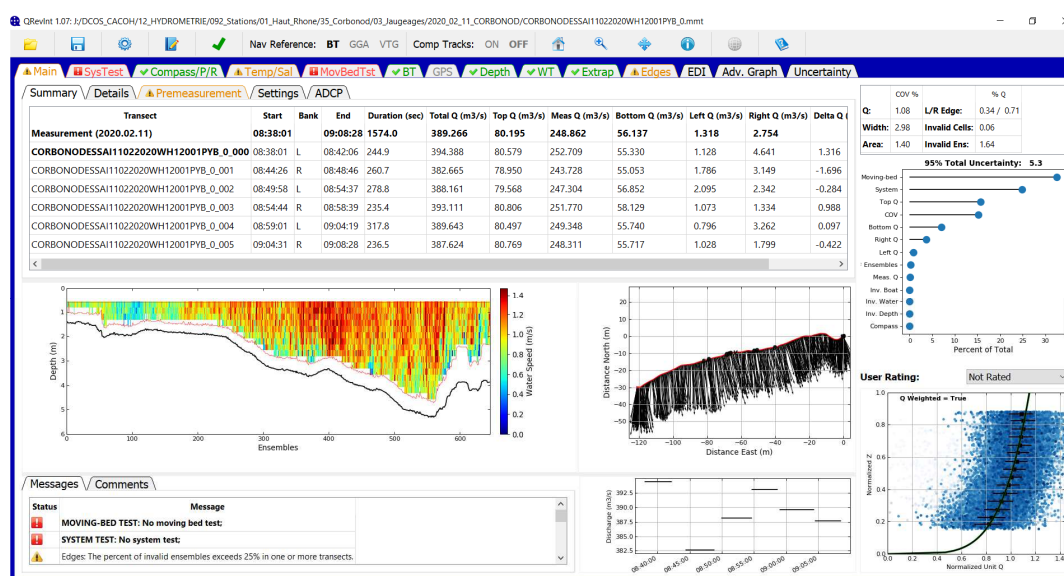


Figure 2 : Interface du logiciel open-source QRevInt permettant de quantifier l’incertitude des jauges ADCP

Le calcul de l’incertitude des jauges par dilution de traceur (salin ou fluorescent) n’a pas fait l’objet d’autant de propositions. A notre connaissance, seule la méthode SUNY (Hauet, 2020) propose actuellement un cadre suffisamment exhaustif et conforme aux principes du GUM. Cette méthode a été implémentée dans un logiciel RShiny pour l’instant uniquement applicable aux instruments TQ-tracer de Sommer.

Ces méthodes de propagation des incertitudes sont utiles à deux niveaux. D’une part, elles fournissent une estimation de l’incertitude de mesure qui accompagne la donnée et permet à l’utilisateur d’en faire un usage éclairé. D’autre part, le bilan d’incertitude associé permet d’évaluer le poids relatif des différentes sources d’erreur dans la variance totale (cf. les différents termes de l’Eq. 1), et donc de cibler celles qui sont à réduire en priorité en vue de l’amélioration du processus de mesure. Typiquement, pour un jaugeage au courantomètre, on pourra évaluer si l’incertitude peut être réduite en augmentant le nombre des verticales, en les plaçant plus judicieusement, ou plutôt en utilisant un instrument plus adapté aux vitesses rencontrées, etc. Cependant, il reste un travail important pour modéliser et estimer certaines composantes d’incertitude, notamment celles propres aux performances de chaque modèle d’instrument de mesure, et celles liées à des effets de site et d’opérateur.

En perspective, il reste à développer des méthodes de propagation des incertitudes adaptées à certaines techniques hydrométriques. L’implémentation d’une méthode adaptée aux jauges ADCP stationnaires (verticale par verticale) dans le logiciel QRevIntMS est en cours. Elle reprend à la fois des

éléments de la méthode Oursin communs aux jaugeages par ADCP mobile et stationnaire, et des éléments des méthodes développées pour les jaugeages par exploration des vitesses, en particulier l’estimation de l’incertitude d’intégration latérale (liée au nombre limité de verticales). Les quatre principales options de la littérature (méthodes ISO748, Q+, Flaure, IVE) devraient être disponibles dans QRevIntMS d’ici fin 2023. Notons que des calculs d’incertitude applicables aux jaugeages par vidéo sont toujours manquants, malgré des développements réalisés sur les incertitudes liées à l’orthorectification des images (Le Coz *et al.*, 2021) et à la détermination des déplacements de surface par LSPIV (Bodart, 2023). L’assemblage d’une méthode applicable à tout jaugeage vidéo de façon opérationnelle est un objectif pour ces prochaines années.

3. Incertitude des jaugeages estimée par essais interlaboratoires

En complément des approches par propagation, dans lesquelles l’incertitude est en quelque sorte modélisée, une approche expérimentale des incertitudes est possible et d’ailleurs utile pour vérifier les méthodes par propagation. Les services hydrométriques ont organisé des intercomparaisons de jaugeages sur le terrain depuis longtemps, à des fins de vérification des protocoles et matériels, mais c’est il y a une quinzaine d’années seulement qu’a émergé leur utilisation pour quantifier l’incertitude de mesure, avec l’organisation de véritables essais interlaboratoires par le GDH (Le Coz *et al.*, 2016 ; Despax *et al.*, 2019). Ces essais interlaboratoires sont pratiqués régulièrement dans d’autres domaines de la métrologie (analyses chimiques et biologiques, notamment). Leur organisation et leur exploitation pour calculer l’incertitude sont spécifiées par des documents normatifs (ISO5725-2 et ISO21748). Fondamentalement, il s’agit de réunir un ensemble de participants (ou « laboratoires ») munis de leur équipement de mesure pour mesurer une même grandeur (ou « mesurande ») de façon répétée. Une analyse de variance (ANOVA) à un facteur, appliquée aux résultats de mesure, permet de quantifier un « écart-type de répétabilité » s_r (variabilité moyenne des résultats répétés d’un même participant) et un « écart-type interlaboratoire » s_L (variabilité moyenne des résultats moyens entre les participants). La combinaison de ces deux écarts-types fournit une estimation de l’incertitude de mesure de la technique, dans les conditions des essais, biais de la méthode exclu (la référence étant la moyenne de tous les résultats de tous les participants). Si une référence suffisamment précise pour estimer l’incertitude $u(\delta)$ due à ce biais collectif est disponible, elle peut également être prise en compte. La formule généralisée proposée par Le Coz *et al.* (2016) permet de calculer l’incertitude élargie $U(Q^{N,P})$ d’une mesure de débit établie comme la moyenne des résultats de P participants ayant fourni chacun N résultats répétés :

$$U(Q^{N,P}) = k \sqrt{\frac{s_r^2}{N \times P} + \frac{s_L^2}{P} + u^2(\delta)} \quad (\text{Eq. 2})$$

avec k le facteur d’élargissement ($k = 2$ pour un niveau d’incertitude à 95%). L’approche est applicable à toute technique de jaugeage, à condition de pouvoir répéter les mesures (au moins 2 fois) et de réunir plusieurs participants mesurant un même débit (constant) avec une instrumentation et des performances similaires. Des tests statistiques sont appliqués aux résultats bruts pour exclure des participants dont les résultats ne seraient pas homogènes (en justesse² et fidélité³) avec ceux de l’ensemble des autres participants. La méthode s’avère particulièrement bien adaptée aux jaugeages par ADCP mobile en raison de la rapidité de mesure de cette technique, permettant la répétition d’un grand nombre de mesures, ce qui réduit l’incertitude d’estimation des écarts-types s_r et s_L . En général, un jaugeage ADCP est la moyenne des débits mesurés par un seul opérateur ($P = 1$) lors de N traversées successives en sens

² Justesse : étroitesse de l’accord entre la moyenne d’un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence (JCGM 2008b).

³ Fidélité : étroitesse de l’accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d’objets similaires dans des conditions spécifiées (JCGM 2008b).

opposé (habituellement $N = 6$ en France : Le Coz *et al.*, 2008 ; Puechberty *et al.*, 2017). L’incertitude $u(\delta)$ due au biais collectif de tous les ADCP est souvent difficile à estimer, faute de référence de débit précise.

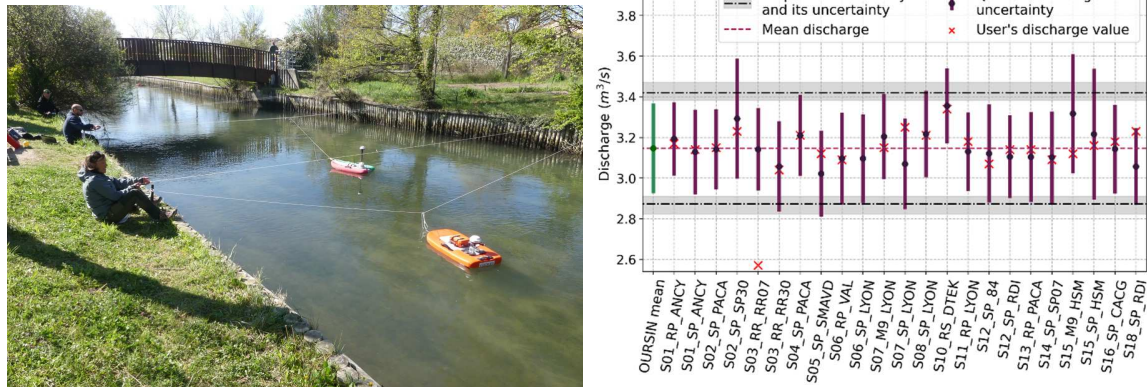


Figure 2 : Quantification empirique des incertitudes des jaugeages ADCP par essais interlaboratoires : intercomparaison organisée par le Service de Prévision des Crues Grand-Delta sur la Sorgue en avril 2022 (à gauche) et incertitudes des débits mesurés calculées empiriquement et par la méthode Oursin avec le logiciel QRAM (à droite)

L’ensemble des calculs ont été implémentés dans un tableur, qui n’est pas malheureusement plus maintenu, associé au guide national sur les intercomparaisons en hydrométrie (Bertrand et Collobert, 2016). Développé récemment par INRAE, le logiciel QRAM (basé sur QRevInt) permet de rejouer en masse un ensemble de jaugeages ADCP et de calculer l’incertitude moyenne par la méthode des essais interlaboratoires, par application de l’équation 2 pour des valeurs de N et P données (cf. exemple Figure 3). L’incertitude de mesure individuelle du jaugeage de chaque participant est également calculée par la méthode OURSIN présentée plus haut, ce qui permet une comparaison des deux approches (essais interlaboratoires et méthode par propagation).

Le plan d’expérience des essais interlaboratoires peut être étendu à l’étude de plusieurs sources d’incertitudes, comme ce fut le cas pour l’intercomparaison ADCP de Chauvan en 2016 (Despax *et al.*, 2019). Dans ce cas, les participants ont répété leurs mesures sur un ensemble de sections de cours d’eau, au lieu d’une seule pour les autres intercomparaisons. Cette permutation a rendu possible une analyse de variance (ANOVA à 2 facteurs) permettant de séparer l’effet section (conditions du site de mesure) des autres effets (opérateur, instrument, procédure) dans le bilan de variance totale. Ce type d’expérience est plus exigeant que les essais usuels mais riche d’enseignements sur les sources d’incertitude affectant une technique de jaugeage, dans des conditions de mesure données. Une perspective de développement du logiciel QRAM serait de proposer également ce calcul d’incertitude à plusieurs facteurs. La possibilité d’importer et exploiter des résultats d’essais interlaboratoires faits avec d’autres techniques de mesure que l’ADCP en est une autre.

4. Incertitude des courbes de tarage et des hydrogrammes (approche bayésienne)

Pour quantifier les incertitudes sur les séries temporelles de débit (ou hydrogrammes) produites selon le workflow classique décrit sur la Fig. 1, il est essentiel de quantifier les incertitudes associées aux courbes

de tarage hauteur-débit. Là encore, une bonne dizaine de méthodes ont été proposées par différentes équipes de recherche ces quinze dernières années, reposant sur des principes plus ou moins différents. Six d’entre elles, ainsi que la méthode traditionnelle proposée dans les documents ISO et OMM, basées sur les résidus entre jaugeages et courbe de tarage, ont été comparées sur trois cas de stations hydrométriques par Kiang *et al.* (2018). Cette dernière méthode présente en effet de sévères limitations, la nécessité de disposer d’au moins 12 jaugeages par segment de courbe n’étant pas la moindre. L’exercice de comparaison a surtout montré que les différences de principes entre les méthodes, parfois mineures (trois méthodes étant basées sur l’inférence bayésienne), produisent néanmoins de substantielles différences d’estimation des incertitudes. Ainsi, les résultats ne peuvent être interprétés qu’en fonction des hypothèses posées dans chaque méthode.

Parmi les méthodes plus récentes, seulement trois sont à notre connaissance utilisées par des services opérationnels (ce dont nous n’avons pas d’exemple pour la méthode ISO/OMM malgré son ancienneté bien plus grande) : il s’agit de la méthode GesDyn (EDF) et des méthodes bayésiennes du NVE (Norvège) et BaRatin (INRAE). Cela illustre le chemin qui reste à parcourir entre le développement et la validation d’une méthode, et sa diffusion opérationnelle via un logiciel documenté et utilisable par des hydromètres. Nous présentons ici l’approche bayésienne BaRatin (Le Coz *et al.*, 2014) aujourd’hui utilisée par un grand nombre d’acteurs académiques et opérationnels via le logiciel libre BaRatinAGE, dont une vue de l’interface graphique est présentée Figure 4.



Figure 4 : Interface du logiciel open-source BaRatinAGE pour quantifier l’incertitude des courbes de tarage et hydrogrammes

Ce logiciel permet d’établir des courbes de tarage et des hydrogrammes avec des incertitudes quantifiées. Le cadre bayésien permet de définir naturellement des connaissances a priori sur les paramètres de l’équation de la courbe de tarage, elle-même établie à partir de l’identification de contrôles hydrauliques connus ou supposés par l’utilisateur. Ces contrôles sont les caractéristiques physiques du chenal qui déterminent la relation hauteur-débit au point de mesure, et donc la courbe de tarage. Pour simplifier, on distingue deux types de contrôles : les contrôles par section (correspondant au passage de l’écoulement par le régime critique au niveau d’une chute ou d’un rétrécissement) et les contrôles par chenal (correspondant à un écoulement dominé par les pertes de charges par friction). A partir d’informations

(précises ou non), facilement fournies par l’hydromètre, sur la nature, les dimensions et l’enchaînement des contrôles, une courbe de tarage « a priori » peut être estimée avec ses incertitudes, avant d’être affinée grâce à l’information contenue dans les observations (les jaugeages eux aussi munis de leur incertitude individuelle) en une courbe de tarage « a posteriori ». Outre la prise en compte des incertitudes des sources d’information et la quantification de celle des paramètres de la courbe de tarage, la base hydraulique, même simplifiée, de BaRatin permet de guider le tracé de la courbe de tarage, en particulier dans les gammes de débit pour lesquelles on ne dispose que de peu voire d’aucuns jaugeages, en hautes eaux notamment. BaRatin permet de propager l’incertitude de la courbe de tarage mais aussi l’incertitude du limnigramme pour calculer l’hydrogramme et son incertitude (Horner *et al.*, 2018). Ce qui manque par contre, ce sont des méthodes métrologiques opérationnelles pour quantifier l’incertitude des mesures de hauteur d’eau, incluant les principales sources d’erreur dont fidélité et justesse des capteurs, batillage, déformation de la section, résolution temporelle, raccordement à l’échelle de référence, etc.

Le logiciel BaRatinAGE et la méthode BaRatin ont été utilisés par plusieurs centaines d’utilisateurs en France et à l’étranger, académiques ou opérationnels, parmi lesquels on peut citer les services hydrométriques de l’Etat en France, de la Compagnie nationale du Rhône (CNR, France), de l’observatoire national NEON aux Etats-Unis, et de l’Autorité de bassin Matanza Riachuelo (Acumar) en Argentine. Au moins 15 articles scientifiques de groupes extérieurs au développement de BaRatin utilisant la méthode ont été recensés. Outre la documentation du logiciel et les sessions de formation données en français, anglais et espagnol, des vidéos d’introduction à la méthode en français et anglais sont disponibles sur la [chaîne YouTube du GDH](#).

Une version 3 du logiciel BaRatinAGE est en cours de développement. Elle remplace notamment le cœur de calcul par l’exécutable *BaM!* (Mansanarez *et al.*, 2019), une plateforme de simulation bayésienne permettant l’estimation d’une grande variété de modèles, dont le modèle BaRatin. Tout en conservant l’environnement de travail actuel adapté aux courbes de tarage, cela ouvre la voie à l’intégration de méthodes plus avancées pour traiter les courbes de tarage complexes ne se limitant pas à une relation univoque entre hauteur et débit. Notamment, des méthodes ont été proposées pour détecter (Darioenzo *et al.*, 2021) et estimer les détarages, c’est-à-dire les changements dans la relation hauteur-débit dus à l’évolution du lit (Mansanarez *et al.*, 2019), à la végétation aquatique saisonnière (Perret *et al.*, 2021), ou à d’autres processus.

5. Incertitudes hydrométriques spécifiques en crue

La chaîne de quantification des incertitudes présentée en Figure 1 a pour objectif de prendre en compte l’ensemble des facteurs et modes opératoires qui jouent un rôle dans l’estimation du débit d’un cours d’eau. En période de crue, les incertitudes vont être plus fortes sur les trois composantes de la chaîne : mesure de la hauteur, jaugeages et courbe de tarage (Lang *et al.*, 2006). Il est important de passer en revue les différents phénomènes à l’origine de cette détérioration de la qualité d’estimation du débit en crue. Rappelons néanmoins que, quoique pour des raisons différentes (détarages, faible sensibilité de la courbe de tarage, végétation aquatique saisonnière, forte incertitude des jaugeages), l’incertitude relative (en %) des débits d’étiage est le plus souvent bien plus élevée que celle des débits de crue.

La mesure de hauteur en crue peut être plus délicate du fait : 1/ du batillage et d’oscillations de la surface libre et de la difficulté à lire la cote à l’échelle pour vérifier et si besoin recalibrer la cote mesurée par le capteur ; 2/ de variations rapides du niveau répercutées avec retard sur le capteur ; 3/ de vibrations dans le support du capteur induites par des vents violents ou les forts courants ; 4/ d’une complexité de la surface libre et d’un emplacement non optimal du capteur (concentration des écoulements sur une partie

de la section en cas de station positionnée dans un virage, perte de charge singulière liée à un rétrécissement au droit d'un pont ou au déplacement d'un ressaut hydraulique) ; 5/ d'une surcote temporaire (influence aval d'un affluent en crue, perte de charge liée au vent, à la glace). Le fait de pouvoir contrôler en crue le niveau « réel » à la station, soit via un observateur de terrain soit par des caméras, peut être déterminant pour lever un doute sur une cote jugée « douteuse » en situation de crue. On peut mentionner le cas extrême de destruction du capteur lors de crues violentes, qu'il convient d'anticiper au moment de l'installation de la station ou en doublant la mesure de niveau pour les secteurs stratégiques.

Les jaugeages en crue sont plus difficiles à réaliser du fait des fortes vitesses d'écoulement et de la présence d'objets flottants. On peut basculer sur un mode opératoire simplifié voire dégradé. L'objectif est de réduire le temps de la mesure et l'exposition des opérateurs et du matériel. La section d'écoulement peut être parcourue sur un nombre réduit de points ou verticales, par la méthode d'intégration sur la verticale, ou uniquement en surface. Le fait de réduire le temps de la mesure permet d'affecter plus facilement une hauteur au débit jaugé, lorsque le niveau d'eau varie rapidement. Le recours ces dernières années à des jaugeages « non intrusifs » en période de crue (analyse d'images successives, mesure radar) est un réel progrès. L'incertitude de mesure d'un débit de crue par ces mesures de surface est plus forte que celle d'un jaugeage complet en moyennes eaux, mais on dispose au moins d'une mesure, ce qui n'était pas le cas auparavant avec des courbes de tarage fortement extrapolées en crue.

L'incertitude sur la courbe de tarage augmente en période de crue (cf. Figure 4), du fait de jaugeages moins nombreux et plus incertains, et de conditions d'écoulement plus difficiles à représenter. Pour le lit mineur, il s'agit de changements sur la morphologie de la rivière et de la section d'écoulement. En cas de débordement en lit majeur, on peut être confronté à : 1/ des pertes de charge spécifiques au moment du débordement du lit mineur dans le lit majeur ; 2/ des variations saisonnières dans l'occupation du lit majeur (forêt, cultures d'été, embâcles) ; 3/ un contrôle hydraulique issu de multiples facteurs qui de plus peuvent être variables (arches de ponts, embâcles, grandes surfaces d'écoulement avec frottements variables sur un grand linéaire...) 4/ des conditions d'écoulement qui induisent une relation hauteur-débit plus complexe qu'une simple loi puissance (effet de stockage – laminage dans le lit majeur) ; 5/ à un « contournement » de la station hydrométrique en cas d'activation de bras secondaires. Dans ces cas complexes comme pour les cas plus simples, la modélisation hydraulique 1D voire 2D est un outil utile pour réduire l'incertitude des parties extrapolées des courbes de tarage. L'information hydraulique issue de simulations numériques peut être utilisée pour préciser la courbe de tarage a priori dans la méthode BaRatin.

6. Conclusion et perspectives

Depuis la création du Schapi en 2003 et du GDH en 2005, et en partenariat avec les équipes de recherche et services hydrologiques internationaux, la communauté hydrométrique française a cherché à développer et valider les outils nécessaires à une chaîne de traitement des incertitudes hydrométriques, depuis les mesures de terrain (jaugeages, limnigrammes) jusqu'aux hydrogrammes, en passant par les courbes de tarage. Cet objectif est notamment mis en avant dans la Charte Qualité de l'Hydrométrie (Puechberty *et al.*, 2017). La chaîne n'est pas encore complète mais un certain nombre d'outils sont d'ores et déjà opérationnels.

Ces différents outils permettent aujourd'hui aux producteurs de données hydrométriques d'être capables de quantifier l'incertitude et de la fournir aux utilisateurs de données afin qu'ils en tiennent compte dans toute la variété des post-traitements, assimilations et autres utilisations possibles. Une réflexion est à mener avec les hydrologues et les prévisionnistes en particulier pour définir la forme la plus utile pour

leur communiquer ces incertitudes : ensemble de réalisations, distributions, écarts-types, intervalles de confiance, quantiles, niveaux qualitatifs, etc. Cette réflexion est également nécessaire pour que l’incertitude des données hydrométriques soit bancarisée et mise à disposition dans les archives hydrologiques comme l’Hydroportail en France.

Dans le contexte spécifique de la prévision des crues et des inondations, des méthodes restent à développer pour estimer l’incertitude accrue des jaugeages non intrusifs (vidéo, radar...) et des estimations post-crue (retours d’expérience), notamment pour estimer les conditions d’écoulement (coefficients de surface, résistance hydraulique, remous) et l’évolution des fonds (dont la respiration du lit) pendant l’événement. Il faut également mieux prendre en compte les détarages qui peuvent survenir en hautes eaux et mettre à jour l’incertitude des données fournies en temps réel. En retour, les prévisions hydrologiques sont souvent utiles pour optimiser les campagnes de jaugeage en crue pour documenter au mieux le haut des courbes de tarage.

7. Remerciements

Le travail de longue haleine pour le développement d’outils pour quantifier les incertitudes hydrométriques a été soutenu de façon essentielle par le Schapi (merci à Rachel Puechberty, Elodie Dufeu, Stéphanie Pitsch, Bruno Janet), la Compagnie nationale du Rhône (merci à Gilles Pierrefeu, Karine Delamarre) et Electricité de France (merci à Christian Perret, Arnaud Belleville). Plus généralement, ces travaux ont bénéficié de nombreux retours d’utilisateurs, dont les hydromètres francophones réunis au sein du Groupe Doppler Hydrométrie (créé en 2005) et à l’international. Qu’ils et elles en soient chaleureusement remerciés ici !

8. REFERENCES

- Bertrand, X., Collobert, M. (2016) *Guide pratique. Intercomparaisons de mesures de débit en rivière*. Ministère de l’Environnement, de l’Énergie et de la Mer, 50 p.
- Bodart, G. (2023). Evaluation et amélioration des méthodes de détermination des vitesses en surface d’écoulement par analyse de séquence d’images, Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 159 p.
- Cohn, T., Kiang, J., Mason, R. (2013). Estimating discharge measurement uncertainty using the interpolated variance estimator. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139 (5), 502–510.
- Dariento, M., Renard, B., Le Coz, J., Lang, M. (2021). Detection of stage-discharge rating shifts using gaugings: A recursive segmentation procedure accounting for observational and model uncertainties. *Water Resources Research*, 57, e2020WR028607.
- Despax, A., Perret, C., Garçon, R., Hauet, A., Belleville, A., Le Coz, J., Favre, A.-C. (2016). 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., Le Coz, J., Hauet, A., Mueller, D. S., Engel, F. L., Blanquart, B., Renard, B., Oberg, K.A. (2019). Decomposition of uncertainty sources in acoustic Doppler current profiler streamflow measurements using repeated measures experiments. *Water Resources Research*, 55(9), 7520–7540.

Despax, A., Le Coz, J., Mueller, D. S., Hauet, A., Calmel, B., Pierrefeu, G., Naudet, G., Blanquart, B., Pobanz, K. (2023). Validation of an uncertainty propagation method for moving-boat acoustic Doppler current profiler discharge measurements. *Water Resources Research*, 59, e2021WR031878.

Díaz Lozada, J.M., Garcia, C.M., Oberg, K., Over, T.M., Nieto, F.F. (2023). Improvements to estimate ADCP uncertainty sources for discharge measurements, *Flow Measurement and Instrumentation*, 90, 102311.

González-Castro, J. A., Muste, M. (2007). Framework for estimating uncertainty of ADCP measurements from a moving boat by standardized uncertainty analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, (12), 1390–1410.

González-Castro, J., Buzard, J., Mohamed, A. (2016). RiverFlowUA—A package to estimate total uncertainty in ADCP discharge measurements by FOTSE—With an application in hydrometry. In *River Flow 2016* (pp. 715–723). CRC Press.

Hauet, A.C. (2020) *Uncertainty of salt discharge measurement: The SUNY Framework*, NVE Rapport 29/2020, The Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE), 17 pages.

Horner, I., Renard, B., Le Coz, J., Branger, F., McMillan, H.K., Pierrefeu, G. (2018). Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty. *Water Resources Research*, 54 (3), 1952–1976.

ISO/TS 25377 (2007). Hydrometry – Hydrometric Uncertainty Guidance (HUG), 59 pages.

JCGM (2008a). Évaluation des données de Mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. Guide No. 100, BIPM, 132 pages.

JCGM (2008b). Vocabulaire international de métrologie — Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM). Guide No. 200, BIPM, 90 pages.

Kiang, J. E., Gazoorian, C., McMillan, H., Coxon, G., Le Coz, J., Westerberg, I. K., et al. (2018). A comparison of methods for streamflow uncertainty estimation. *Water Resources Research*, 54(10), 7149–7176.

Lang, M., Perret, C., Renouf, E., Sauquet, E., Paquier, A. (2006). Incertitudes sur les débits de crue. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 6, 33-41.

Le Coz, J., Pierrefeu, G., Saysset, G., Brochot, J., Marchand, P. (2008). *Mesures hydrologiques par profileur Doppler*, Editions Quae, 164 pages.

Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X., Dramais, G. (2012). Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity–area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26, 18–29.

Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509, 573–587.

Le Coz, J., Blanquart, B., Pobanz, K., Dramais, G., Pierrefeu, G., Hauet, A., Despax, A. (2016). Estimating the uncertainty of streamgauging techniques using in situ collaborative interlaboratory experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 7(142), 04016011.

Le Coz, J., Renard, B., Vansuyt, V., Jodeau, J., Hauet, A. (2021). Estimating the uncertainty of video-based flow velocity and discharge measurements due to the conversion of field to image coordinates. *Hydrological Processes*, 35(5) :e14169.

Mansanarez, V., Renard, B., Coz, J. L., Lang, M., Darienzo, M. (2019). Shift happens! Adjusting stage-discharge rating curves to morphological changes at known times. *Water Resources Research*, 55(4), 2876–2899.

Moore, S. A., Jamieson, E. C., Rainville, F., Rennie, C. D., Mueller, D. S. (2016). Monte Carlo approach for uncertainty analysis of acoustic Doppler current profiler discharge measurement by moving boat. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(3), 04016088.

Mueller, D. S. (2016). QRev—Software for computation and quality assurance of Acoustic Doppler Current Profiler moving-boat streamflow measurements—User’s manual. Rapport technique, US Geological Survey.

Perret, E., Renard, B., Le Coz, J. (2021). A rating curve model accounting for cyclic stage-discharge shifts due to seasonal aquatic vegetation. *Water Resources Research*, 57, e2020WR027745.

Puechberty, R., Perret, C., Poligot-Pitsch, S., Battaglia, P., Belleville, A., Bompart, P., Rauzy, G. (2017). *Charte qualité de l'hydrométrie: Guide de bonnes pratiques*. Groupe Doppler Hydrométrie. CEREMA/CECP d'Angers, Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, France, 83 p.