



HAL
open science

Hydrométrie en crue : les défis et les solutions

Alexandre Hauet, Olivier Payrastre, Jérôme Le Coz, Laurent Bonnifait

► **To cite this version:**

Alexandre Hauet, Olivier Payrastre, Jérôme Le Coz, Laurent Bonnifait. Hydrométrie en crue : les défis et les solutions. Colloque SHF “Prévision des crues et des inondations – Avancées, valorisation et perspectives”, Société Hydrotechnique de France, Nov 2023, Toulouse, France. hal-04398568

HAL Id: hal-04398568

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04398568v1>

Submitted on 16 Jan 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

HYDROMÉTRIE EN CRUE : LES DEFIS ET LES SOLUTIONS

Measuring flood discharge: challenges and solutions

Auteurs : HAUET Alexandre^{1,2*}, PAYRASTRE Olivier³, LE COZ Jérôme⁴, BONNIFAIT Laurent⁵

* *auteur correspondant*

¹EDF-DTG, St Martin le Vinoux, France, alexandre.hauet@edf.fr

²Univ. Grenoble Alpes, Institut des Géosciences de l’Environnement (IGE), UMR 5001, Grenoble, France

³Univ. Gustave Eiffel, Laboratoire Eau Environnement, Nantes, France

⁴INRAE, UR RiverLy, Villeurbanne, France, jerome.lecoz@inrae.fr

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

Résumé : La mesure du débit des rivières en crue présente des difficultés liées aux méthodes traditionnelles intrusives et à l'accès limité pendant les crues. Pour remédier à cela, des techniques non intrusives sont développées, telles que l'analyse Doppler d'écho radar et l'imagerie. Ces méthodes permettent une mesure rapide des vitesses de surface, réduisent les risques pour le personnel et peuvent être utilisées de manière ponctuelle ou permanente. Cependant, elles ne mesurent que la vitesse de traceurs, nécessitant des hypothèses sur leur relation avec la vitesse de surface, puis des hypothèses pour passer à la vitesse débitante. De plus, la bathymétrie des cours d'eau ainsi que la mesure du niveau d'eau, essentielles pour le calcul du débit, sont souvent difficiles à obtenir pendant les crues. Des approches d'estimation a posteriori des débits de pointe sont également utilisées, basées sur des relevés post-crue et la confrontation avec d'autres données. Ces campagnes permettent d'obtenir des estimations réalistes des débits en l'absence de mesures directes, mais nécessitent une analyse de sensibilité pour évaluer les incertitudes. En résumé, malgré les défis techniques, des progrès sont réalisés pour améliorer la mesure du débit des rivières en crue et garantir la sécurité des personnes et des biens.

Mots-clefs : Hydrométrie, Jaugeages non-intrusifs, Débit, enquêtes post-crue

Abstract: The measurement of river discharges during floods presents difficulties due to intrusive traditional methods and limited access during floods. To address this, non-intrusive techniques have been developed, such as Doppler radar echo analysis and imaging. These methods allow for rapid measurement of surface velocities, reduce risks for personnel, and can be used on a temporary or permanent basis. However, they only measure tracer velocity, requiring assumptions to be made about their relationship with surface velocity, and then assumptions to pass to bulk flow velocity. In addition, river bathymetry and water level measurements, essential for discharge calculation, are difficult to obtain during floods. Post-flood estimation approaches for peak flow rates are also utilized, based on post-flood surveys and comparison with other data. These campaigns provide reliable flow rate estimates but require sensitivity analysis to assess uncertainties. In brief, despite technical challenges, progress is being made to improve the measurement of river flow rates during floods and ensure the safety of people and goods.

Keywords: Hydrometry, Non-intrusive gaugings, Discharge, Post-flood field investigations

1. De la difficulté de mesurer le débit des rivières en crue

La connaissance du débit des cours d'eau pendant les crues revêt une importance essentielle pour la sécurité des biens et des personnes. Les prévisions de crues et les vigilances associées sont basées sur des modèles hydrologiques et hydrauliques calés sur des hydrogrammes. Les hydrogrammes sont issus de limnigrammes mesurés aux stations hydrométriques, convertis en débit grâce à la courbe de tarage du site, elle-même construite à partir de mesures de débit. Selon une revue menée par Perret et al. (2017) sur 33 organismes et plus de 20000 mesures, ces jaugeages sont réalisés, en France, très majoritairement par exploration du champ de vitesse (98% des jaugeages), avec des courantomètres ponctuels (mécaniques, acoustiques, électromagnétiques, 45% des jaugeages), ou avec des profileurs de courant acoustiques (ADCP, 53% des jaugeages). Les 2% de mesure restantes sont effectuées avec la méthode de dilution de traceur. Ces méthodes de jaugeages (exploration du champ de vitesse ou dilution) sont intrusives car elles nécessitent la présence d'opérateurs ou de matériels dans la rivière. Lors des crues, les fortes vitesses et les nombreux débris flottants rendent les mesures intrusives trop dangereuses. Le temps de réalisation d'un jaugeage, de l'ordre de 30 minutes pour une mesure avec un ADCP et de 1h pour une mesure au courantomètre, n'est pas compatible avec la dynamique fortement instationnaire des crues (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2017). Les méthodes de jaugeage par dilution sont rendues inapplicables par les fortes concentrations en matières en suspension qui interagissent avec les traceurs utilisés et biaisent les résultats (Lallement et al., 2022). Les conditions d'accès aux sites de mesure sont difficiles pendant les épisodes de crue, quand les routes sont fermées, et les berges de rivières sont instables à cause de l'érosion. Enfin, les épisodes de crue sont souvent généralisés sur de grandes régions géographiques, et les équipes d'hydromètres, aux ressources limitées, ne peuvent pas être partout en même temps...

En conséquence, la gamme jaugée des courbes de tarage est limitée, et les relations hauteur / débit doivent être largement extrapolées aux hautes eaux, avec des biais possibles et des incertitudes associées importantes (Kiang et al., 2018). Ces erreurs et imprécisions en crue se répercutent sur les hydrogrammes générés. Or ces hydrogrammes sont les éléments de base du calage des modèles hydrologiques et hydrauliques utilisées pour la prévision des débits et pour l'estimation des zones inondées. Ce sont aussi ces hydrogrammes qui sont utilisés pour les calculs de débits de temps de retours extrêmes, pour le dimensionnement des ouvrages d'art ou de production électrique (évacuateurs de crue de barrage, protection des centrales nucléaires, par exemple).

Dans cet article, nous présentons une revue des solutions récemment développées par la communauté des hydromètres pour améliorer la qualité des données de débit en crue. Dans une première partie, on montre comment les méthodes de jaugeage non intrusives par analyse Doppler d'écho radar ou par imagerie permettent d'élargir grandement la gamme jaugée d'un site. Dans une seconde partie, des approches consistant à estimer a posteriori les débits de pointe des crues sont présentées et un bilan de leur utilisation en France ces 20 dernières années est détaillé. Enfin, dans une troisième partie, l'intérêt de la modélisation hydraulique, numérique ou simplifiée, pour l'extrapolation des courbes de tarage est abordé.

2. Des solutions non-intrusives pour mesurer le débit des rivières pendant les crues

Face aux limitations du caractère intrusif des méthodes traditionnelles de jaugeage, les mesures hydrométriques sans contact sont une solution alternative intéressante. Deux techniques permettent une mesure non intrusive des vitesses de surface des cours d'eau : l'analyse Doppler d'écho radar et l'imagerie.

Les instruments de type SVR (pour Surface Velocity Radar, voir Welber et al., 2016) envoient vers la surface libre de l'écoulement une onde radar de fréquence λ (généralement en bande K, autour de 25

GHz) grâce à un émetteur et une antenne avec une ouverture d'angle limitée (autour de 10°), comme illustré en Figure 1(c). L'onde radar est rétrodiffusée par les rugosités présentes sur la surface libre, et une partie de l'énergie radar revient vers l'appareil de mesure et est enregistrée. Cet écho rétrodiffusé est affecté par un décalage Doppler (fréquence λ') dû au déplacement des rugosités. On fait l'hypothèse que les rugosités de surface principalement générées par les turbulences de grandes échelles sont advectées à la vitesse de l'écoulement, et sont donc des traceurs de la vitesse de surface du cours d'eau. Connaissant l'angle d'inclinaison θ du faisceau radar par rapport à la surface libre, on peut donc calculer la vitesse ponctuelle de l'écoulement. Il faut préciser que l'analyse en décalage Doppler ne permet d'obtenir que la vitesse radiale (composante de vitesse dans l'axe de tir du radar). Il faut donc que le SVR soit orienté dans le sens de l'écoulement (vers l'amont ou l'aval), perpendiculairement à la section de mesure. Cela implique un déploiement depuis un pont, ce qui est limitant.

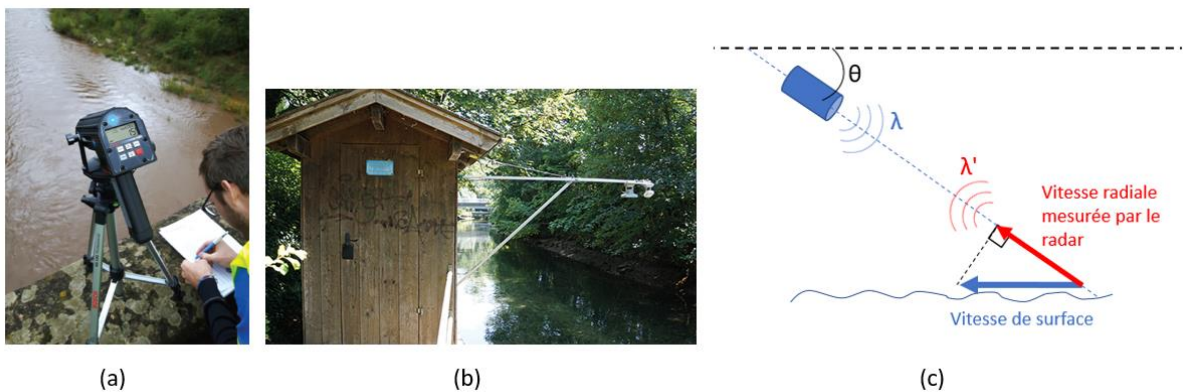


Figure 1: (a) SVR déployé en jaugeage ; (b) SVR en station fixe ; (c) principe de la mesure (θ est l'angle d'incidence du radar, λ et λ' sont les fréquences émise et reçue par le radar).

Le SVR peut être déployé par un opérateur sur différentes positions le long d'une section de mesure, comme illustré en Figure 1(a) : le débit est alors calculé par la méthode classique de la section médiane. Il peut être également installé de façon fixe (Figure 1(b)) et le débit est alors calculé par une méthode d'index de vitesse (relation entre la vitesse ponctuelle de surface et la vitesse débitante de la section de mesure, Costa et al., 2006, Welber et al., 2016, Rahman et al., 2021).

Les méthodes d'analyse d'images (Muste et al., 2008) sont basées sur une série d'étapes, comme illustré en Figure 2 : enregistrement d'une vidéo (Figure 2(a)), séquençage et stabilisation (si besoin) pour obtenir une série d'images horodatées (Figure 2(b)), orthorectification des images pour corriger les distorsions de perspective et passer en coordonnées métriques (Figure 2(c)), et mesure du déplacement de traceurs visibles en surface de l'écoulement (Figure 2(d)). Plusieurs techniques ont été développées depuis le début du XXIème siècle pour pouvoir suivre des motifs sur des images : LSPIV, PTV, STIV... Nous ne rentrerons pas ici dans les détails des techniques, notons simplement qu'elles permettent toutes d'obtenir un champ de vitesse de surface (1D pour la STIV, 2D pour les autres techniques), spatialisé. L'analyse d'image permet donc une mesure quasi instantanée de l'ensemble d'un champ de vitesse sur des surfaces importantes. La généralisation de l'utilisation des drones volants (Eltner et al., 2020) permet aujourd'hui une utilisation simplifiée des méthodes d'analyse d'image (les images, enregistrées au nadir n'étant pas affectée de distorsion de perspective, une simple mise à l'échelle suffit), et permet d'élargir le périmètre d'utilisation à des hydrosystèmes de grandes tailles (le drone permettant de prendre de la hauteur et donc d'imager des zones plus grandes).

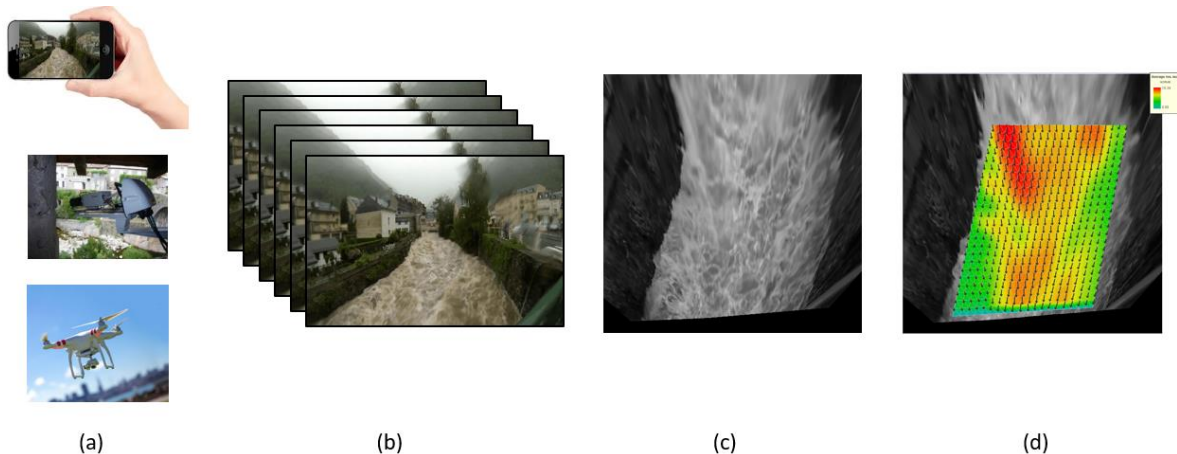


Figure 2: étapes des mesures par analyse d'image. (a) : enregistrement des images ; (b) échantillonnage des images ; (c) orthorectification ; (d) mesure des vitesses (ici par LSPIV)

Les deux familles de méthodes détaillées ci-dessus ont beaucoup de points communs intéressants. Elles permettent de mesurer des vitesses sur une section de rivière beaucoup plus rapidement qu'avec des instruments intrusifs (quelques minutes pour le SVR, quelques secondes pour l'analyse d'image). Leur mise en œuvre sans contact réduit grandement le danger pour le matériel et les opérateurs. Elles peuvent être déployées pour des jaugeages ponctuels, ou utilisées en stations fixes et pérennes. Ces installations à demeure scrutent en permanence les écoulements, et permettent de ne pas rater les crues, quelle que soit la soudaineté de celles-ci, et quelles que soient les conditions d'accès.

Mais ces méthodes présentent aussi des limitations communes. Elles ne permettent de mesurer que la vitesse de traceurs de l'écoulement (vaguelettes pour le radar, motifs visibles pour l'imagerie). Il faut donc faire l'hypothèse que ces traceurs ont une vitesse égale à la vitesse de surface, ce qui peut être rendu caduque par la présence de vent, de vagues gravitaires, de ressauts hydrauliques, de reflets, etc. Les conditions de crue sont cependant favorables à la présence de traceurs et à la limitation des effets parasites. Ces méthodes non intrusives permettent uniquement une mesure des vitesses de surface. Pour calculer le débit, il est nécessaire de connaître la bathymétrie d'une ou plusieurs sections en travers du cours d'eau, ainsi que de faire des hypothèses hydrauliques sur la distribution des vitesses en profondeur. De nombreuses études ont montré que dans des conditions d'écoulement proches du régime uniforme, la vitesse moyennée sur la profondeur peut être estimée à partir de la vitesse de surface via un coefficient multiplicatif variant de 0,7 à 0,9 (Hauet et al., 2018). Des singularités locales peuvent amener à des valeurs plus extrêmes, entre 0,6 et 1,2 typiquement, voire au-delà (Le Coz et al., 2010, Welber et al., 2016). La mesure de la bathymétrie des sections, qui ne peut se faire qu'avec des moyens intrusifs (perche, sonar acoustique), ne peut être réalisée pendant les épisodes de crue. On devra donc associer une bathymétrie mesurée avant ou après une crue à un champ de vitesse mesurée pendant la crue. Pour des crues importantes, morphogènes, la bathymétrie des cours d'eau peut radicalement changer, provoquant des erreurs importantes dans le calcul du débit. Des méthodes non intrusives de mesure de la bathymétrie pendant les crues sont étudiées (Lidar, GPR), mais à ce jour il n'y a pas de solutions opérationnelles convaincantes.

3. L'estimation post-crue des vitesses et débits de pointe

Pour les événements échappant aux réseaux de mesure fixes et/ou aux capacités de déploiement de moyens de jaugeage en cours d'événement, les approches consistant à estimer a posteriori les débits de pointe des crues se sont largement développées au cours des deux dernières décennies.

Ces approches se sont développées en France dans le cadre de l’Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes Vivarais (www.ohmcv.osug.fr), suite aux crues de 1999 dans l’Aude (Eric Gaume et al., 2004), puis de 2002 et 2008 dans le Gard (Delrieu et al., 2005; Gaume et al., 2009). Les aspects méthodologiques ont été décrits et consolidés au sein de deux projets de recherche européens (Floodsite, <https://www.floodsite.net/>, et Hydrate), et sont détaillées dans plusieurs publications (Gaume, 2006; Gaume & Borga, 2008; Lumbroso & Gaume, 2012). Ils ont plus récemment fait l’objet d’un chapitre dédié dans la charte qualité de l’hydrométrie (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2017). Les estimations de débits de pointe se basent sur des relevés de terrain post crue, permettant d’estimer la section d’écoulement, la pente et forme de la ligne d’eau, dans des sections sélectionnées au préalable pour leur caractère favorable à une estimation de la vitesse d’écoulement, en raison d’un contrôle hydraulique simple à appréhender. En complément, des éléments objectifs (photos, vidéos, témoignages) permettant de confirmer l’estimation des niveaux d’eau et des vitesses sont recherchés. Pour gagner en fiabilité, les estimations de débits de pointe obtenues sont également confrontées à la pluviométrie observée, aux autres estimations disponibles à l’amont ou aval immédiat, et aux informations fournies par les stations d’hydrométrie. Ceci qui permet notamment d’invalider certaines estimations jugées douteuses car peu cohérentes avec les informations disponibles par ailleurs. Enfin une analyse de sensibilité aux sources d’incertitude (section, pente, estimation du coefficient de Strickler...) est systématiquement conduite de façon à fournir un intervalle des débits possibles en complément de la valeur estimée.

Ce type de campagne a été reconduit de façon systématique depuis 2010 pour documenter les crues majeures ayant affecté les régions méditerranéennes, dans le cadre du programme de recherche HyMeX (www.hymex.org, Amponsah et al., 2018; Ducrocq et al., 2019; Payrastra et al., 2019; Brigode et al., 2021; Payrastra et al., 2022). Ces campagnes « HyMeX » ont permis d’obtenir au total 277 estimations de débits de pointe en France depuis 2010, pour des gammes de surface drainée de 0,4 à 1981 km². Les débits spécifiques estimés se situent dans une gamme de 0.2 à 27 m³.s⁻¹.km².

La Figure 3 propose une synthèse des valeurs des vitesses moyennes d’écoulement estimées, qui varient de 0,8 à 9,5 m.s⁻¹. Il est à rappeler ici que ces vitesses restent des estimations, qui ne peuvent pas être systématiquement vérifiées via des éléments d’observation objectifs, mais qui néanmoins n’aboutissent pas à de fortes incohérences avec la pluviométrie ni avec les autres informations disponibles sur les débits de pointe. Les estimations jugées douteuses ont été éliminées sur ce graphique. La figure 3.a illustre la diversité des pentes du lit (I) dans les sections d’estimation, et l’évolution correspondante des vitesses moyennes estimées (V). La diversité des vitesses s’explique principalement par la diversité des sections d’écoulement, plus ou moins larges et présentant des hauteurs d’eau très variables, ainsi que par la présence dans certains cas de sections mixtes lit mineur/lit majeur. La figure 3.b présente les mêmes données, en tenant compte cette fois de la forme de la section via le rayon hydraulique (R_h). La tendance à l’augmentation des vitesses estimées avec la pente et le rayon hydraulique apparaît ainsi un peu plus nettement ici, comme prévu par la formule de Manning-Strickler $V = K \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2}$. Toutefois, une grande diversité subsiste. Les valeurs de vitesses moyennes estimées correspondent majoritairement à une plage de coefficients de Strickler K de 10 à 20 (figure 3.b), mais peuvent ponctuellement sortir de cette gamme. Cette diversité, ainsi que celle des vitesses estimées, s’expliquent par l’encombrement variable des sections, par leur caractère parfois mixte (distinction lit mineur/majeur qui n’apparaît pas sur les vitesses moyennes présentées ici), et par la présence de quelques estimations réalisées sur des ouvrages. Il faut également noter que le coefficient représentant les pertes de charge par friction englobe en pratique d’autres pertes de charge et compense des erreurs de modélisation...

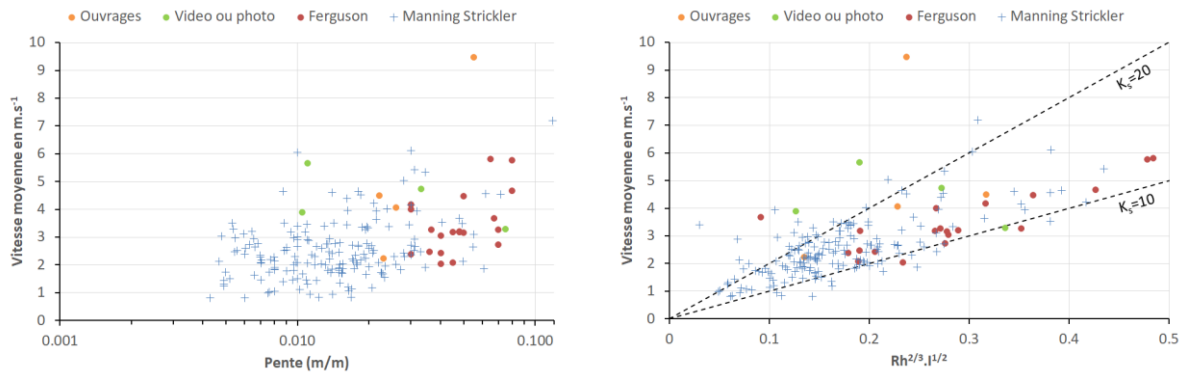


Figure 3 : Représentation des estimations de vitesses d’écoulements estimées lors des campagnes post-crue HyMeX, en fonction a) de la pente locale du lit I (en m/m), et b) du rayon hydraulique Rh et de la pente I ($Rh^{2/3} \cdot I^{1/2}$). Les méthodes d’estimation des vitesses sont présentées dans chaque cas : ouvrage (seuil, passage souterrain...), exploitation de photos ou vidéos, formules de Ferguson ou Manning-Strickler

4. Des solutions pour améliorer l’extrapolation des courbes de tarage

Malgré les efforts mis en œuvre par les hydromètres pour mieux jauger ou estimer les débits de crue, les parties des courbes de tarage représentant les hauts débits sont calées sur peu de mesures, et doivent toujours être extrapolées. Les extrapolations de courbes de tarage à haut débit viennent au mieux de calculs hydrauliques simplistes, la plupart du temps un ajustement sur les jaugeages de crue (lorsqu’il y en a !), voire parfois d’une simple analyse géométrique, voire « esthétique », sur la forme de la courbe. Les maximums jaugés étant souvent assez loin des limites d’extrapolation des courbes de tarage, les méthodes d’extrapolation basées sur les jaugeages sont très incertaines, et peuvent générer des biais importants. Les maximums jaugés représentent souvent des écoulements encore contenus dans les lits mineurs. Il n’y donc pas de prise en compte de l’effet de la géométrie et de la rugosité des lits majeurs ou du changement possible du contrôle hydraulique en fonction du débit (noyage de seuil de contrôle, mise en charge d’ouvrages tels que les ponts sur lesquels sont souvent installés les capteurs de mesure de hauteur d’eau, effet de contrôles hydrauliques en aval comme des barrages ou des confluences, etc.). Il est donc essentiel de guider l’extrapolation des CT par une modélisation des contrôles hydrauliques, qu’elle soit basée sur de simples formules de déversoir ou de frottement (méthode BaRatin par exemple) ou sur les résultats de simulation numérique, 1D en général.

Plusieurs méthodes tenant compte des contrôles hydrauliques pour extrapoler les courbes de tarage sont utilisées traditionnellement par les services hydrométriques, dont l’extrapolation graphique en espace log-log par l’USGS (Rantz et al., 1982). La méthode BaRatin (Le Coz et al., 2014) est également basée sur l’identification de contrôles hydrauliques déterminant (au premier ordre) la relation hauteur-débit au point de mesure de la station hydrométrique. Deux types de contrôles sont identifiés : contrôles par chenal (pertes de charge par frottement) ou par section (section critique créée par une chute ou un rétrécissement, en général). La nature et les paramètres des contrôles sont aisément documentables par les hydromètres, à partir de leur connaissance usuelle des écoulements à leurs sites de mesure, pour différentes conditions hydrologiques. Ces informations sont transformées en équation de courbe de tarage et en distributions a priori des paramètres de cette courbe. Le théorème de Bayes permet d’établir (à un coefficient près) la distribution a posteriori de ces paramètres, à partir de la distribution a priori et des observations (jaugeages) assorties de leur incertitude de mesure. Cette distribution a posteriori est échantillonnée (par technique MCMC) de façon à établir la courbe de tarage la plus probable et son incertitude, qui peut ensuite être propagée à tout calcul d’hydrogramme. Cette approche par hydraulique simplifiée, accessible à tout opérateur de station hydrométrique, permet de contenir les erreurs d’extrapolation de la courbe de tarage en hautes eaux, en fournissant une estimation de l’incertitude associée, et en rendant explicites les hypothèses faites pour établir cette extrapolation, facilitant ainsi sa

justification et sa révision ultérieure. L'identification des contrôles et leur estimation a priori peuvent également utiliser des résultats de simulation numérique.

La modélisation numérique hydraulique est un outil intéressant pour prendre du recul sur le fonctionnement hydraulique d'une station (Hauet et al., 2018). Les modèles 1D restent suffisamment simples, en termes de paramétrage et d'analyse des résultats, pour être utilisés et valorisés par des hydromètres non aguerris à la modélisation. La zone modélisée doit être assez grande pour inclure les éléments pouvant modifier le lien entre la hauteur et le débit, que ce soit des éléments latéraux (forme du lit, passage du lit mineur au lit majeur, présence de casiers...) ou longitudinaux (singularités dans la pente, présence de retenues, de rampes, d'ouvrages d'art) et pour limiter l'effet de la condition limite aval retenue dans le modèle. Une attention particulière est donc à apporter aux relevés topographiques et bathymétriques. Le calage se fait généralement sur les coefficients de rugosité (Strickler pour des contrôles hydrauliques par tronçon, coefficient de seuil pour des contrôles hydrauliques par section), en essayant de reproduire au plus juste les jaugeages à haut débit mesurés à la station, ou, encore mieux, les pentes de la surface libre telles que relevées grâce aux laisses de crue. Il a été montré qu'une approche par modélisation hydraulique peut conduire à des extrapolations extrêmement différentes d'une extrapolation simple, particulièrement en présence de singularités en aval modifiant la hauteur d'eau (débordement en lit majeur, contraction de l'écoulement, mise en charge d'un ouvrage...). La Figure 4 illustre un exemple d'application sur le Cernon à St Georges de Luzençon. La station hydrométrique (étoile bleue) se situe en amont immédiat d'un pont routier (POH2), d'une passerelle piétonne (POH4) environ 200 m en aval, et d'un seuil important (POH5) environ 700 m en aval. Lors de la crue du 28/11/2014 qui a atteint une hauteur à l'échelle de 5,35 m, la courbe de tarage, tracée initialement jusqu'à une hauteur de 3 m, a été extrapolée en urgence par ajustement d'une loi puissance sur les jaugeages (courbe rouge sur la Figure 4(b)). Cette extrapolation simple donnait des valeurs de débit pour la pointe de de crue beaucoup trop élevées, supérieures à $5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ en débit spécifique. Le modèle hydraulique 1D prenant en compte les singularités à l'aval a permis de montrer que la mise en charge de la passerelle piétonne, puis la réduction de débitance due au pont routier impactaient fortement les hauteurs d'eau à la station. Le débit de point de la crue obtenu par le modèle hydraulique est alors estimé à $340 \text{ m}^3/\text{s}$, une valeur qui a été validée par l'exploitant de la station vue sa cohérence avec les éléments hydrologiques disponibles.

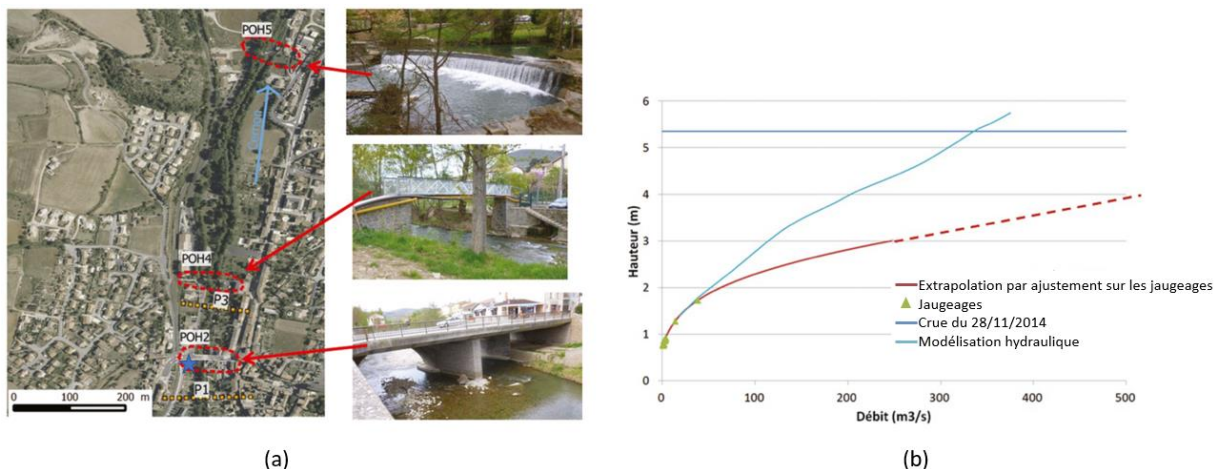


Figure 4 : exemple de modélisation sur le Cernon à Saint Georges de Luzençon. (a) Carte du site avec l'emplacement de la station hydrométrique (étoile bleue) et des singularités en aval pouvant influencer sur le contrôle hydraulique. (b) Courbe de tarage extrapolée par ajustement sur les jaugeages et courbe issue du modèle hydraulique.

L'utilisation d'un modèle numérique hydraulique sur une station hydrométrique permet donc de prendre du recul sur le fonctionnement hydraulique, et de comprendre des éléments essentiels comme la modification des contrôles hydrauliques selon les gammes de débits. A EDF-DTG, par exemple, cette application a été généralisée à la quasi intégralité des stations hydrométriques.

5. Conclusions et perspectives

L'amélioration des méthodes d'hydrométrie traditionnelle pour pouvoir mesurer les débits des crues constitue un enjeu important pour une meilleure prévision de ces phénomènes extrêmes. Les méthodes de jaugeage non-intrusives (SVR, imagerie) sont une alternative intéressante, et aujourd'hui d'un niveau de maturité, en ce qui concerne la mesure sans contact des vitesses, permettant des applications opérationnelles. L'usage de drones volants va certainement se développer car le pilotage est accessible aux équipes d'hydrométrie et ce support aérien léger présente des avantages décisifs : faible coût, rapidité de déploiement, résout des problèmes d'accès aux sites de mesure en crue, liberté de choix de la section de mesure la plus adaptée (conditions hydrauliques notamment), réglage de l'angle de vue le plus adapté à la vélocimétrie (traceurs, reflets, ombres, etc.), mesure et dépouillement grandement facilités (pas de correction de perspective si visée verticale, pas besoin de points de références topographiés). Néanmoins, la mesure de la bathymétrie en crue est aujourd'hui impossible, rendant les estimations de débit par méthodes non-intrusives souvent très incertaines. Des perspectives intéressantes apparaissent avec l'utilisation de Lidar ou de radar géologiques pénétrants, mais on est encore loin d'une application simple et utilisable par des services opérationnels. Le jaugeage par satellite proprement dit suppose une mesure de vitesse de surface, qui peut se faire par les techniques d'imagerie usuelles (Everard et al., 2023). Cependant, le coût des séquences d'image est prohibitif, l'accès aux données compliqué, et la probabilité que les images existent pour un événement donné est assez faible (fréquence de visite très limitée, couverture nuageuse, résolution parfois trop limitée, etc.). Le drone reste un vecteur bien plus efficace pour cela. L'altimétrie par satellite se développe, en particulier avec la mission SWOT lancée en décembre 2022, susceptible de fournir des lignes d'eau à assez haute résolution et précision pour aider la modélisation hydraulique. Là encore, la probabilité d'obtenir des acquisitions en cours de crue est très faible vu la fréquence de passage (1 à 4 visites tous les 21 jours), mais l'intérêt pour l'identification des contrôles hydrauliques et le calage des modèles est réel. Il faut bien préciser ici que ces méthodes de jaugeage non-intrusives n'ont pas vocation à remplacer les techniques traditionnelles intrusives, qui sont parfois applicables en crue (grâce à l'ingéniosité des hydromètres permettant des adaptations et améliorations), mais sont une série de méthodes supplémentaires et pertinentes dans la « boîte à outil » de l'hydromètre.

Les estimations post-crue des débits de pointe et des vitesses maximales apportent une information capitale (et souvent la seule information disponible) pour les événements extrêmes. Malgré la logistique importante qu'ils demandent sur le terrain, ces exercices sont de plus en plus souvent mis en œuvre. L'accès parfois possible à des éléments objectifs (photos, vidéos) permettant d'estimer des grandeurs physiques telles que les vitesses d'écoulement maximales, en plus des débits de pointe, est d'intérêt pour l'amélioration de la modélisation hydraulique des crues. Une organisation de ces retours d'expérience post crue avec une approche participative par le grand public (crowdsourcing) ou par des partenaires professionnelles intervenant à proximité des cours d'eau permettrait d'obtenir des informations plus complètes, plus facilement. Par exemple, des collectes organisées de vidéos et de photos post-crue apporterait des informations cruciales sur les zones inondées et les vitesses d'écoulements.

Enfin, l'extrapolation des courbes de tarage grâce à la modélisation hydraulique, simplifiée (BaRatin) ou numérique est riche en enseignements, et devrait être largement utilisée sur les réseaux d'hydrométrie. Les outils de modélisation, de plus en plus accessibles, sont utilisables par des hydromètres non spécialistes de la modélisation. La revue des résultats de modélisation par les hydromètres de terrain, connaissant les stations hydrométriques et les écoulements à différents régimes, est essentielle.

Notons enfin que les problématiques hydrométriques abordées dans cet article sur les crues sont directement transposables aux étiages : difficulté de jauger (faibles vitesses, faibles tirants d’eau), extrapolation des courbes de tarage hors de la gamme jaugée... Les incertitudes relatives (en % du débit) associées aux hydrogrammes pour les tout petits débits sont encore plus importantes que pour les crues (pouvant dépasser 100% pour des stations instables, selon la Charte qualité de l’hydrométrie (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2017).

6. REFERENCES

- Amponsah, W., Ayrat, P.-A., Boudevillain, B., Bouvier, C., Braud, I., Brunet, P., et al. (2018). Integrated high-resolution dataset of high-intensity European and Mediterranean flash floods. *EARTH SYSTEM SCIENCE DATA*, 10(4), 1783–1794. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1783-2018>
- Brigode, P., Vigoureux, S., Delestre, O., Nicolle, P., Payrastre, O., Dreyfus, R., et al. (2021). French Riviera floods: hydrometeorological comparison of 2015 and 2019 extremes events. *LHB-HYDROSCIENCE JOURNAL*, 107(1). <https://doi.org/10.1080/27678490.2021.1976600>
- Costa JE, Cheng RT, Haeni FP, Melcher N, Spicer KR, Hayes E, Plant W, Hayes K, Teague C, Barrick D (2006) Use of radars to monitor stream discharge by non-contact methods. *Wat Resources Res* 42(7). <https://doi.org/10.1029/2005WR004430>
- Delrieu, G., Ducrocq, V., Gaume, E., Nicol, J., Payrastre, O., Yates, E., et al. (2005). The catastrophic flash-flood event of 8-9 September 2002 in the Gard region, France: A first case study for the Cevennes-Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory. *JOURNAL OF HYDROMETEOROLOGY*, 6(1), 34–52. <https://doi.org/10.1175/JHM-400.1>
- Ducrocq, V., Boudevillain, B., Bouvier, C., Braud, I., Fourri, N., Lebeaupin-Brossier, C., et al. (2019). HyMeX - Advances in understanding and forecasting of heavy precipitation and flash floods in the Mediterranean. *HOUILLE BLANCHE-REVUE INTERNATIONALE DE L EAU*, (3–4), 5–12. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019048>
- Eltner, A., Sardemann, H., Grundmann, J. (2020). Technical Note: Flow velocity and discharge measurement in rivers using terrestrial and unmanned-aerial-vehicle imagery. *Hydrology and Earth System Sciences*. 24. 1429–1445. [10.5194/hess-24-1429-2020](https://doi.org/10.5194/hess-24-1429-2020).
- Everard, N., Dixon, H., Sarkar, S., Randall, M., Schumann, G. (2023). The FluViSat project: Measuring streamflow from space with very high resolution Planet satellite video. *EGU General Assembly 2023*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1374>
- Gaume, E. (2006). Methodological note on post flash-flood investigations (FLOODsite project No. deliverable report D23.2) (p. 54p.). Retrieved from <http://www.floodsite.net>
- Gaume, E., & Borga, M. (2008). Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods: proposal of a methodology and illustrations: Post-flood field investigations in upland catchments. *Journal of Flood Risk Management*, 1(4), 175–189. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2008.00023.x>
- Gaume, Eric, Livet, M., Desbordes, M., & Villeneuve, J.-P. (2004). Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *Journal of Hydrology*, 286(1–4), 135–154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.015>
- Gaume, Eric, Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., et al. (2009). A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1–2), 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>

- Hauet, A., Morlot, T., Daubagnan, L. (2018). Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers. E3s web of conferences 40, 06015
- Hauet, A., Mary, V., Rosset, C., Marcucci, S., Soubeyran, S., Garcia-Aznar, P., Morlot, T., Du Boisberranger, N., Arrighi, C., Riou, D. (2017) Topographic data and hydraulic modeling for the extrapolation of rating curves: application on the hydrometric network of EDF-DTG, *La Houille Blanche*, 103:6, 73-78, DOI: 10.1051/lhb/2017061
- Kiang, J., Gazorian, C., McMillan, H., Coxon, G., Le Coz, J., Westerberg, I., Belleville, A., Sevez, D., Sikorska, A., Petersen-Øverleir, A., Reitan, T., Freer, J., Renard, B., Mansanarez, V., Mason, R. (2018). A Comparison of Methods for Streamflow Uncertainty Estimation. *Water Resources Research*, 7149-7176, 54.10, <https://doi.org/10.1029/2018WR022708>
- Lallement, C., Belleville, A., Hauet, A. & Perret, C. (2022). La mesure de débit par dilution—Quel avenir pour cette technique ? *LHB-Hydrosience Journal*. doi.org/10.1080/27678490.2022.2083992
- Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., Camenen, B. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology* 2010, 394(1-2), 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.049>
- 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.
- Lumbroso, D., & Gaume, E. (2012). Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges. *Journal of Hydrology*, 414–415, 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.048>
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. (2017). Charte qualité de l’hydrométrie, Guide de bonnes pratiques (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Direction Générale de la Prévention des Risques). Retrieved from www.eaufrance.fr/IMG/pdf/Schapi_Charte_hydro_P01-84_BasseDefinition_5Mo_.pdf
- Muste, M., Fujita, I., Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resour. Res.*, 44, W00D19, doi:10.1029/2008WR006950
- Payrastre, O., Gaume, E., Javelle, P., Janet, B., Fourmigué, P., Lefort, P., et al. (2019). Analyse hydrologique de la crue-éclair catastrophique du 15 juin 2010 dans la région de Draguignan (VAR, France). *La Houille Blanche*, 105(3–4), 140–148. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019057>
- Payrastre, O., Nicolle, P., Bonnifait, L., Brigode, P., Astagneau, P., Baise, A., et al. (2022). The 2 October 2020 Alex storm in south-eastern France: a contribution of the scientific community to the flood peak discharges estimation. *LHB-HYDROSCIENCE JOURNAL*. <https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2082891>
- Perret, C. (2017). Enquête sur la représentativité des mesures aux moulins. GDH.
- Rahman Khan, M., Gourley, J.J., Duarte, J.A., Ayral, P.-A., Fulton, J.W. (2021). Uncertainty in remote sensing of streams using noncontact radars. *Journal of Hydrology*, 603, 126809
- Rantz, S. E. (1982). Measurement and Computation of Streamflow : Volume 2. Computation of discharge. Geological Survey Water-Supply Paper, 2175
- Welber, M., Le Coz, J., Laronne, J., Zolezzi, G., Zamler, D., Dramais, G., Hauet, A. & Salvaro, M. (2016). Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *WRR* (52-2). doi.org/10.1002/2015WR017906.



Colloque SHF “*Prévision des crues et des inondations – Avancées, valorisation et perspectives*”
Toulouse, 28-30 novembre 2023