



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0). La citation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI.

## Outils pour améliorer la mesure du débit minimum biologique des petits cours d'eau

Guillaume DRAMAIS<sup>1</sup>, Jérôme LE COZ<sup>1</sup>, Jean-Maxence DITCHE<sup>2</sup>, Fabien THOLLET<sup>1</sup>, Benoit CAMENEN<sup>1</sup>, Mickaël LAGOUY<sup>1</sup>, Adrien BONNEFOY<sup>1</sup>, Fanny COURAPIED<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRAE, Équipe Hydraulique des rivières, Riverly, Villeurbanne, France.

<sup>2</sup> Office français de la biodiversité (OFB), Direction régionale Auvergne-Rhône-Alpes, Bron, France.

Correspondance : Guillaume DRAMAIS, [guillaume.dramais@inrae.fr](mailto:guillaume.dramais@inrae.fr)

*En France, le contrôle du respect du débit minimum biologique en aval des aménagements est assuré par les agents en charge de la police de l'eau, majoritairement ceux de l'Office français de la biodiversité. Dans cet article, les auteurs présentent deux exemples de travaux récents, menés en appui à ces agents. Le premier est la réalisation d'un essai interlaboratoire de mesures de débit par la méthode par dilution de traceur. Le second est le développement et la diffusion d'un modèle de perche transparente à charge dynamique, un outil de mesure de débit à bas coût.*

### Introduction

L'accès à l'eau est vital dans notre société pour l'alimentation en eau potable, irriguer les cultures, produire de l'énergie mais aussi pour différents usages industriels et récréatifs. Ces besoins grandissant, nos cours d'eau sont sous tension et il est nécessaire de réguler et contrôler les différents usages pour permettre aux rivières de supporter ces prélèvements et maintenir un bon état écologique. De plus, on observe notamment en France les liens entre le dérèglement climatique et la fréquence des phénomènes extrêmes d'étiages (Giuntoli *et al.*, 2013). Dans ce contexte, l'équilibre des rivières est très fragilisé avec de nombreux impacts sur l'état écologique des cours d'eau. L'Office français de la biodiversité (OFB) chargé entre autres de missions de police de l'eau en France peut s'assurer que les différents usagers autorisés à prélever ou dériver de l'eau dans les cours d'eau respectent le droit de l'environnement (Code de l'environnement, 2006). En effet si le prélèvement ou la dérivation d'une partie de la ressource est autorisé sous certaines conditions, les bénéficiaires doivent s'assurer qu'ils laissent suffisamment d'eau à la rivière pour le maintien de conditions propices à la vie, la reproduction et la circulation des espèces. Souvent appelé débit réservé, le débit minimum biologique (DMB) est le débit instantané laissé à la rivière et qui généralement ne doit pas être inférieur au dixième du module du cours d'eau en aval immédiat ou

au droit de l'ouvrage de dérivation. Le module ou débit moyen interannuel est évalué à partir des informations de débit disponibles portant sur une période minimale de cinq années. Le DMB pour un ouvrage donné est établi par l'administration et fait l'objet d'arrêtés. L'un des outils pour vérifier le bon respect du DMB est la mesure du débit par jaugeage lors d'opérations de contrôle, par des agents de police de l'eau.

L'équipe Hydraulique des rivières de l'unité de recherche Riverly d'INRAE, héritière des savoir-faire de la division Hydrologie-Hydraulique du Cemagref accompagne depuis maintenant trente ans les agents chargés des contrôles du DMB à l'OFB. Ce partenariat, qui a pris différentes formes, a produit de nombreux outils pratiques (guides, fiches techniques, formations, logiciels, tutoriels vidéo) et a permis une adaptation des agents aux évolutions des techniques de jaugeage des cours d'eau. Cette collaboration a notamment permis la formation professionnelle d'une quinzaine d'agents par an depuis plusieurs années ainsi que la réédition d'un guide pour le contrôle du débit minimum biologique qui fait référence pour le jaugeage des petits cours d'eau (Le Coz *et al.*, 2011). Par ailleurs, INRAE et l'OFB s'impliquent dans les travaux de la commission de normalisation AFNOR X10C et son homologue internationale ISO TC113, ce qui permet d'assurer l'adéquation entre procédures de contrôle et normes.

Dans cet article, nous présentons deux exemples de travaux issus de la convention 2019-2021 entre l'OFB et INRAE. Ces exemples illustrent l'utilité de cette collaboration et l'adéquation entre les questions opérationnelles et ce que la recherche appliquée peut apporter pour y répondre. Le premier exemple illustre la mise en œuvre d'essais d'intercomparaison d'instruments de mesure pour valider les pratiques et évaluer l'incertitude d'une méthode de jaugeage. Le second exemple présente un nouvel instrument très simple, à bas coût, pour le jaugeage des cours d'eau, qui permet d'étendre le périmètre d'intervention des agents.

### Généralités sur le jaugeage des cours d'eau

Le jaugeage des cours d'eau consiste à déterminer le débit d'une rivière à un instant  $t$  et en un lieu donné. Cette mesure est dite indirecte, car on ne mesure pas le débit mais des grandeurs intermédiaires qui nous permettent de calculer le débit. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer le débit qui ont chacune des avantages et des inconvénients. On différencie classiquement quatre types de méthodes :

- la méthode de jaugeage par capacité qui consiste à mesurer le temps de remplissage d'un récipient de volume connu. La gamme de débit mesurable par cette méthode est assez limitée et elle est assez difficile à mettre en œuvre en rivière ;
- les méthodes dites hydrauliques qui consistent à établir une relation (sous forme d'une équation mathématique) entre la hauteur d'eau mesurée à un endroit précis d'un ouvrage calibré ou de géométrie simple et le débit traversant cet ouvrage. Là encore l'application en rivière naturelle n'est pas évidente mais sur de nombreux ouvrages de dérivation ou de restitution de l'eau, il est possible d'utiliser de telles méthodes ;
- la méthode de jaugeage par dilution de traceur consiste à mesurer le niveau de dilution d'un produit chimique injecté dans la rivière (sel, traceur coloré). On peut calculer le débit du cours d'eau en mesurant la concentration en traceur à une distance du point d'injection suffisante pour que le traceur soit pleinement mélangé. Cette méthode est adaptée à une gamme de débit modeste (jusqu'à quelques  $m^3/s$ ) dans des écoulements plutôt turbulents, facilitant le mélange du traceur ;
- les méthodes de jaugeage par exploration du champ de vitesse sont les plus répandues et de nombreux instruments ont été développés pour s'adapter à presque toute la gamme de débits rencontrés en rivière. Ces méthodes consistent à évaluer une vitesse moyenne et la surface mouillée de la section, le produit des deux donnant le débit. La mesure de vitesse peut être effectuée avec des capteurs utilisant des technologies très variées (moulinets mécaniques, capteurs électromagnétiques, capteurs acoustiques, radar, analyse d'image, flotteurs, perches transparentes). Le choix de l'instrumentation va dépendre de la gamme de débit, du matériel disponible et du savoir-faire des équipes de jaugeage.

Ces différentes techniques de jaugeage peuvent être pratiquées par les agents OFB chargés des contrôles du DMB. Cependant les agents ne disposent pas de toute la panoplie des instruments de jaugeage, ce qui nécessiterait des investissements très lourds et un entretien de savoir-

faire difficile à tenir sur une tâche qui n'est qu'une partie des missions des agents de terrain de l'OFB. Ce constat a motivé la diffusion aux services de l'OFB d'un outil de jaugeage simple à bas coût qu'est la perche transparente à charge dynamique (Le Coz *et al.*, 2021).

Par ailleurs, l'un des domaines de recherche actif en hydrométrie depuis quelques années est l'évaluation des incertitudes de mesure des jaugeages. En effet comme toute mesure, le jaugeage est entaché d'une incertitude qui représente l'intervalle de confiance que l'on va attribuer à la mesure. Dans un contexte de tension sur la gestion de la ressource en eau, la connaissance de cette incertitude devient primordiale pour aider les gestionnaires à prendre des décisions adaptées. L'incertitude de mesure peut être calculée par différentes méthodes d'évaluation plus ou moins complexes. Parmi ces méthodes, l'intercomparaison d'instruments de mesure est une solution très intéressante dans un domaine, la mesure de débit des cours d'eau, où il n'existe pas d'étalons rattachés au système international ou de mesure de référence (Le Coz *et al.*, 2016). Pour contribuer à l'amélioration continue des mesures de débit, un essai d'intercomparaison d'instruments exploitant la méthode par dilution de traceur a été mené en 2021 sur une partie de la flotte d'instruments utilisés à l'OFB.

### Intercomparaison de jaugeage par dilution de sel

Dans le cas du contrôle du DMB, la prise de décision, en particulier le constat d'infraction, implique de connaître le résultat de mesure du jaugeage avec son incertitude. La notion d'incertitude de mesure est de plus en plus courante dans de nombreux domaines pour donner un intervalle de confiance et permettre des décisions adaptées. En effet, une incertitude quantifiée permet de calculer la probabilité d'être sous le seuil réglementaire et donc de prendre une décision en connaissant le niveau de risque de se tromper.

Pour estimer l'incertitude d'une mesure, on utilise couramment la méthode de propagation des incertitudes décrite dans le GUM (*Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*) (JCGM, 2008)<sup>1</sup>. En complément de la méthode de propagation des incertitudes, méthode de référence qui nécessite de modéliser l'ensemble du processus de mesure, la méthode expérimentale des essais interlaboratoires présente un grand intérêt pour quantifier les incertitudes d'une méthode de mesure, dans des conditions données. Cette méthode, très utilisée dans certains domaines (chimie, biologie, etc.), est encadrée par des normes ISO compatibles avec le GUM (ISO 21748, 2017 ; ISO 5725-2, 2019). Ainsi, les comparaisons interlaboratoires hydrométriques initiées en France par le Groupe Doppler Hydrométrie en 2009 (cf. encadré « En savoir plus ») permettent de quantifier l'incertitude résultant des erreurs de mesure qui s'expriment lors de la répétition de jaugeages simultanés par plusieurs opérateurs en conditions de répétabilité et de reproductibilité, pour un débit constant. Des calculs statistiques permettent de quantifier, à partir des résultats expérimentaux, des variances de répétabilité et des variances interlaboratoires, et par combinaison l'incertitude de la méthode de jaugeage testée.

1. Joint Committee for Guides in Metrology.

La méthode de détermination du débit d'un cours d'eau par la mesure de dilution de traceur est basée sur l'hypothèse de la conservation de la masse de ce traceur. Le principe général consiste à injecter dans la rivière une solution concentrée de traceur et à rechercher dans quelle proportion cette solution a été diluée par la rivière (photo 1). On effectue pour cela une mesure de concentration à l'aval du point d'injection. Le taux de dilution du traceur est proportionnel au volume d'eau écoulé pendant la durée de la mesure. Par conservation de la masse de traceur, on peut calculer le débit à partir de la concentration moyenne observée en aval pendant le temps de passage du traceur. Connaissant ce temps de passage du traceur on peut déterminer le débit du cours d'eau. Les préconisations pour la réalisation de jaugeages par dilution sont à retrouver dans la charte qualité de l'hydrométrie (Puechberty *et al.*, 2017) et le guide pour le contrôle du DMB (Le Coz *et al.*, 2011).

Une comparaison interlaboratoire de mesures de débit par la méthode de dilution par injection instantanée d'une solution saline a été menée en mai 2021. Cette expérience a eu lieu en Aveyron sur le ru de l'Homède à Creissels (code hydro : O3405610). Quinze instruments de différents services territoriaux de l'OFB ont été confrontés, plusieurs configurations et positions dans le cours d'eau ont été testées lors de quatre essais avec trois répétitions d'injections successives de solutions salines. Les résultats de mesure de débit de l'un des essais sont présentés sur la figure 1, il s'agit d'un essai en laissant les capteurs dans une même position centrale sur le transect de mesure. La sensibilité de la méthode à d'autres facteurs d'influence a été testée lors de ces essais, notamment le fait de réaliser un étalonnage *in situ* des instruments ainsi que la sensibilité des instruments à des doses de sel trop faibles. Enfin, un essai a permis de tester différentes distances de mélange, ce qui est l'un des paramètres les plus influents pour cette méthode. Ce type de campagne d'essai a de nombreux avantages :

- évaluer une incertitude sur la méthode de mesure testée,
- rappeler les principes et les limites de la méthode (en particulier la distance de mélange),
- faire pratiquer et partager les agents sur leurs pratiques,
- prendre conscience des performances possibles des instruments mis en œuvre dans les services.

Cette intercomparaison a été organisée dans le cadre de la convention nationale OFB-INRAE mais ce genre d'événement peut être facilement renouvelé à plus petite échelle (régionale par exemple) avec moins d'équipes ou d'autres services locaux d'hydrométrie (SPC<sup>2</sup>, DREAL<sup>3</sup>, syndicats mixtes). Un guide national existe pour aider à l'exploitation des données (Bertrand *et al.*, 2016).

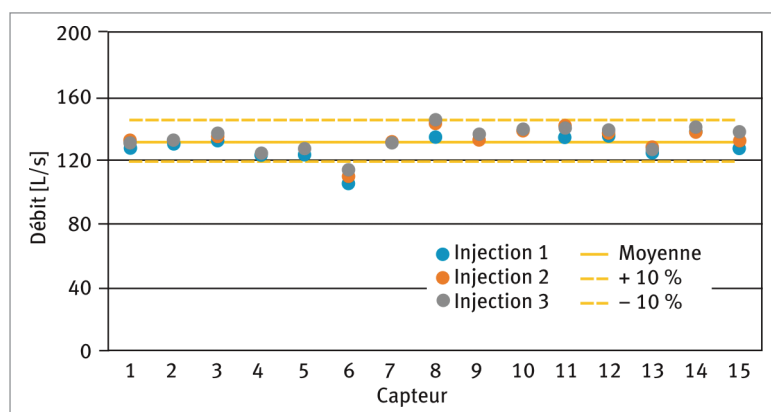
### Un nouvel outil pour le jaugeur : la perche transparente

Les courantomètres et moulinets déployés sur perche sont couramment utilisés pour jauger les cours d'eau. Ils nécessitent un suivi régulier de leurs performances (par comparaison interlaboratoire ou étalonnage en vitesse pour certains), ils sont souvent fragiles, encombrants et parfois très onéreux pour les versions les plus sophistiquées. En complément de ces outils, un modèle de

**Photo 1** – Exemple d'injection de traceur coloré (Rhodamine WT) sur le Ru de l'Homède à Creissels pour évaluer la distance de bon mélange entre le point d'injection et le point de mesure. Crédit photographique : G. Dramais.



**Figure 1** – Résultats de mesure d'un essai avec trois injections successives et les quinze capteurs installés dans la même position sur le transect.



perche à charge dynamique, décrit par Wilm et Storey (1944) et amélioré ensuite par Fonstad *et al.* (2005) puis Pike *et al.* (2016) est constitué de réglés et d'éléments en plexiglass transparent qui permettent une mesure de différence de charge. Cet outil très simple a été testé et validé dans différentes conditions. Il peut être bien adapté à certains contrôles du DMB.

La perche transparente à charge dynamique est en effet un outil de jaugeage peu coûteux, peu encombrant, facile et rapide à utiliser, fournissant des mesures de débits fiables dans les bonnes conditions d'application. Cet outil a aussi l'avantage de pouvoir mesurer de faibles tirants d'eau (5 cm) là où les moulinets et courantomètres ne sont pas utilisables. De plus, sans piles, cet instrument n'est pas sujet aux pannes électriques et ne nécessite pas de maintenance particulière. Le principe de mesure est de déterminer la différence de niveau d'eau  $\Delta h$  (en millimètres) entre l'amont et l'aval de la perche dont la face la plus large est opposée à l'écoulement (photo 2 et encadré 1). La valeur de  $\Delta h$  augmente avec la charge dynamique liée à la vitesse de l'écoulement moyenne

2. Service de prévision des crues.  
3. Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement.



**Photo 1** – Déploiement d'une perche à charge dynamique sur le Durzon à Nant (Aveyron) lors d'une formation à la mesure du débit minimum biologique. Crédit photographique : G. Dramais.



sur la verticale,  $V$  (en m/s). On calcule ensuite la vitesse moyenne sur la verticale à partir de  $\Delta h$  à l'aide d'une formule semi-empirique établie par Pike *et al.* (2016).

Les bonnes conditions pour déployer cet outil sont une section avec un écoulement droit, perpendiculaire au transect de mesure car la perche n'est pas autocomposante. Cette perche permet de mesurer le débit d'un cours d'eau ou d'un canal qui peut se traverser à pied, pour des profondeurs allant de 5 à 70 cm et des vitesses comprises entre 20 et 120 cm/s (Le Coz *et al.*, 2021).

Le modèle développé par INRAE en 2020 coûte moins de 200 € et reste assez facile à construire. Des expériences de comparaisons réalisées dans un laboratoire d'hydraulique et sur différents sites de terrain ont permis de confirmer la relation d'étalonnage semi-empirique établie par Pike *et al.* (2016). Les débits jaugés s'écartent généralement de moins de 10 % du débit considéré comme référence, sauf quand l'écoulement principal est trop lent (inférieure à 20 cm/s). Un opérateur peut être formé rapidement (une demi-heure) et le jaugage est sensiblement plus rapide qu'un jaugage au courantomètre classique parce que le positionnement est plus rapide, et qu'un seul « point » est mesuré par verticale (mesure directe de la vitesse moyenne sur la verticale). Le temps nécessaire à l'ajustement des réglés est bien plus court que le temps d'exposition d'un moulinet ou courantomètre. Cette technique est particulièrement recommandée lorsque le coût de l'instrumentation est limitant et qu'une incertitude de l'ordre de  $\pm 10\%$  est tolérable. Du fait de sa facilité d'utilisation et de son coût, cet outil pourrait à terme être transféré à des utilisateurs moins aguerris ou utilisé à des fins pédagogiques, par exemple.

Pour les agents de l'OFB, cet outil peu encombrant et facile à mettre en œuvre peut permettre la mise en évidence rapide d'une infraction importante à la réglementation sur le respect du DMB. Les perches à charge dynamique sont diffusées dans le cadre de la convention OFB-INRAE lors des formations annuelles après une formation au déploiement et aux limites d'utilisation.

#### Encadré 1 – Calcul de la vitesse à partir de la charge dynamique.

Calculer la vitesse à partir de la charge dynamique :

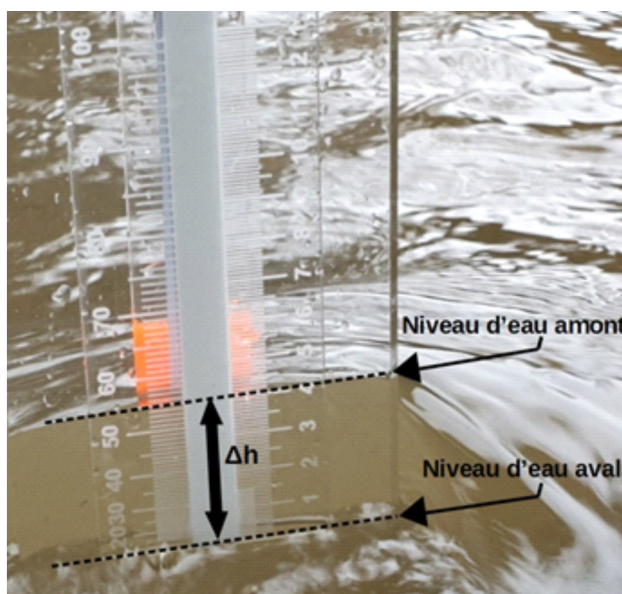
$$V = 0,641 \sqrt{2g \Delta h} - 0,019$$

Avec :

$V$  la vitesse moyenne sur la verticale [m/s]  
 $\Delta h$  la charge dynamique [m]  
 $g$  l'accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>]

(Pike *et al.*, 2016)

Les graduations de la perche (photo ci-contre) permettent une lecture directe de la vitesse en cm/s et de la charge dynamique en cm.



## Conclusion

Le bon respect du DMB doit garantir un partage équitable de la ressource en eau indispensable pour assurer tous les usages et le maintien en bon état écologique des cours d'eau. Pour connaître les débits disponibles et maîtriser la ressource, la mesure est indispensable. Les équipes d'hydrométrie des différents réseaux (DREAL, SPC, producteurs d'énergie, bureaux d'études, syndicats mixtes, équipes de recherche) travaillent ensemble à l'amélioration des pratiques. Cette dynamique s'illustre au travers de différents groupes de travail nationaux (Commission de normalisation X10C de l'AFNOR, Groupe Doppler Hydrométrie, conférences Hydrométrie de la Société Hydrotechnique de France, Journées de l'hydrométrie du

## Encadré – En savoir plus.

Retrouvez de nombreuses informations et outils de l'hydrométrie francophone sur le site du Groupe Doppler Hydrométrie : <https://gdh.inrae.fr/>

SCHAPI<sup>4</sup>). L'OFB contribue au travers de la convention avec INRAE au développement des nouveaux outils pour l'hydrométrie comme la perche transparente à charge dynamique et à la maîtrise des processus de mesure en participant à des intercomparaisons d'instruments pour l'hydrométrie. Ces actions contribuent à l'amélioration continue des pratiques d'hydrométrie et à la connaissance et la bonne gestion des débits des cours d'eau.

4. Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations.

## RÉFÉRENCES

- Bertrand X., Collobert M., Besson D., Puechberty R., 2016. Guide pratique Intercomparaisons de mesures de débit en rivière. MEEM/DGPR, 52 p.
- Code de l'environnement, 2006. Article L214-18, [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article\\_lc/LEGIARTI000006833152/](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006833152/).
- Fonstad M., Reichling J., Van de Grift J., 2005. The transparent velocity-head rod for inexpensive and accurate measurement of stream velocities. *Journal of Geoscience Education*, 53(1), 44-52, <https://doi.org/10.5408/1089-9995-53.1.44>.
- Giuntoli I., Renard B., Vidal J. P., Bard A., 2013. Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices. *Journal of Hydrology*, 482, 105-118, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.038>.
- ISO 21748, 2017. Lignes directrices relatives à l'utilisation d'estimations de la répétabilité, de la reproductibilité et de la justesse dans l'évaluation de l'incertitude de mesure, <https://www.iso.org/fr/standard/71615.html>.
- ISO 5725-2, 2019. Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure – Partie 2 : Méthode de base pour la détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée, <https://www.iso.org/fr/standard/69419.html>.
- JCGM, 2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. ISO. Geneva ISBN, vol. 50, 134 p.
- Le Coz J., Camenen B., Dramais G., Ribot-Bruno J., Ferry M., Rosique J.-L., 2011. Guide technique pour le contrôle des débits réglementaires. Éditions ONEMA, 132 p.
- Le Coz J., Blanquart B., Pobanz K., Dramais G., Pierrefeu G., Hauet A., Despax A., 2016. Estimating the uncertainty of stream gauging techniques using in situ collaborative interlaboratory experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(7), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001109](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001109).
- Le Coz J., Lagouy M., Pernot F., Buffet A., Berni C., 2021. Jaugeages à bas coût par perches transparentes. SHF, Colloque Hydrométrie, [https://riverhydraulics.inrae.fr/wp-content/uploads/2022/04/Poster\\_SHF2021\\_\\_Perches\\_transparentes\\_V0.pdf](https://riverhydraulics.inrae.fr/wp-content/uploads/2022/04/Poster_SHF2021__Perches_transparentes_V0.pdf).
- Puechberty R., Perret C., Poligot-Pitsch S., Battaglia P., Belleville A., Bompard P., Chauvel G., Cousseau J., Dramais G., Glaziou G., Hauet A., Héliouin S., Lang M., Larrarte F., Le Coz J., Marchand P., Moquet P., Payrastre O., Pierrefeu G., Rauzy G., 2017. Charte qualité de l'hydrométrie : Guide de bonnes pratiques. Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, SCHAPI, Groupe Doppler Hydrométrie, 84 p., <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02606950v1>.
- Pike R., Redding T., Schwarz C., 2016. Development and testing of a modified transparent velocity-head rod for stream discharge measurements. *Canadian Water Resources Journal*, 41(3), 372-384, <https://doi.org/10.1080/07011784.2015.1127776>.
- Wilm H., Storey H., 1944. Velocity head rod calibrated for measuring streamflow. *Civil Engineer*, 14(11), 475-476.