Hydrométrie : mesurer les débits d'une rivière, pourquoi et comment ?

Auteur :
LALLEMENT Christian, Ingénieur Hydraulicien, en retraite d'EDF, ancien Directeur à l'Unité de Production Hydraulique Alpes, ancien président de la Commission Française de Normalisation de mesures de débits en rivière.

17-04-2021

Prédire et gérer les débits des cours d'eau est une nécessité pour la maîtrise des crues, l'alimentation en eau, l'agriculture et la production d'énergie. Savoir mesurer ces débits est cependant un préalable. Ceci constitue l'hydrométrie, science distincte et complémentaire de l'hydrologie (science de l'eau dans son environnement naturel) et de l'hydraulique (physique des écoulements). Environ un tiers de la pluie qui tombe sur les continents retourne à la mer et aux océans (les deux autres tiers s'évaporant directement ou étant consommés par les végétaux). A l'échelle de la Terre, ce sont ainsi près de 36 000 km^3 d'eau qui transitent chaque année par les fleuves. Mais ces quantités peuvent être très inégalement réparties, tant d'un continent à l'autre, que –pour une même rivière– d'une année à l'autre ou au sein d'une même année. Cette irrégularité ne peut être approchée qu'en mesurant en permanence les débits de ces rivières. Or, la mesure continue des débits d'un cours d'eau ne peut pas s'obtenir de façon directe, mais est le fruit d'un processus expérimental mariant plusieurs observations de terrain…

1. Mesurer les débits d'une rivière, une question ancienne mais difficile

Figure 1. L'Ouvèze à Vaison la Romaine ; le débit de cette rivière de Provence a pu passer de 0,1 m^3/s —photo de gauche, été 1990— à près de 1200 m^3/s— photo de droite, 22 Septembre 1992— ceci pour un débit moyen annuel proche de 6 m^3/s [Source : crédit EDF DTG]

L'hydrométrie, science distincte et complémentaire de l'hydrologie (science de l'eau dans son environnement naturel) et de l'hydraulique (physique des écoulements) est la discipline qui cherche à **mesurer les débits des rivières**. Le débit —volume d'eau traversant une section de cours d'eau pendant une unité de temps— s'exprime ainsi en mètres cube par seconde (m^3/s).

Chaque cours d'eau suit un **régime particulier**, déterminé par le **rythme des précipitations** et son "terroir" hydrologique. Pour le fleuve le plus alimenté du monde, l'Amazone, la variation de débit entre deux mois extrêmes d'une même n'est que de un à deux. Et d'une année sur l'autre, son débit moyen annuel à son embouchure ne varie que de 10 à 15 % autour de sa valeur de 206 000 m^3/s. **L'Amazone est un fleuve extrêmement régulier**.

A contrario, un fleuve africain comme le Chari présente un débit moyen de 1197 m^3/s à son débouché dans le lac Tchad. Au sein d'une même année, la variation de débit entre deux mois extrêmes est d'un facteur 20 (150 à 3000 m^3/s). Et d'une année à l'autre, l'écoulement annuel moyen peut varier du simple au double : 739 m^3/s en 1942, 1720 m^3/s en 1956. **Le Chari a donc un régime beaucoup plus contrasté.**

Mais comment mesure-t-on ces débits ? Depuis l'Antiquité, l'Homme s'y est intéressé, *a minima*, lorsqu'il est devenu dépendant de l'agriculture. Mais c'est un problème beaucoup plus difficile que sa familiarité pourrait laisser croire. Ce qui fit écrire à James Jeans (physicien britannique, 1877-1946) : « La radiation totale émise par le Soleil dans l'unité de temps, transformée en masse, est quelque chose qui ressemble à 10 000 fois celle de l'eau qui coule dans la Tamise sous le pont de Londres ; et incidemment, si le facteur 10 000 est grossier, ce n'est pas parce que nous connaissons mal la masse exacte de la radiation solaire, mais parce que nous ne sommes pas capables de bien mesurer le débit moyen de la Tamise. »

2. Pourquoi mesure-t-on le débit des rivières de nos jours ?

La mesure des débits d'une rivière répond à plusieurs finalités :

de **gestion opérationnelle d'ouvrages hydrauliques** (aménagements hydro électriques, systèmes d'irrigation, réservoirs d'écrêtement des crues ou de soutien des étiages…) ;

de **dimensionnement** de ces ouvrages, par la connaissance des caractéristiques de ces cours d'eau ;

de **contrôle réglementaire**, pour vérification des obligations de restitution de débit en aval d'ouvrages (débit minimum pour assurer la survie piscicole, le maintien d'autres usages ; la non aggravation des crues), la déclaration d'état de calamité (sécheresses…) ;

de **protection des biens et des personnes**, par l'annonce des crues ;

de **patrimoine**, par la constitution de séries d'observations de longue durée, indispensables pour connaitre les évolutions des régimes des cours d'eau, sensibiliser les populations aux risques naturels, affecter une probabilité aux événements extrêmes (crues, étiages).

Figure 2. Station de mesure des débits de l'Isère à Grenoble sur le campus universitaire de Gières Saint-Martin d'Hères [Source : crédit photo LTHE (Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement, maintenant Institut des Géosciences de l'Environnement, IGE, Grenoble)]

L'intérêt de ces mesures se trouve aujourd'hui **renforcé** par les défis actuels que constituent le **réchauffement climatique**, les nouvelles demandes de **partage de l'eau** entre différents usages (récréatifs, énergétiques, irrigation, eau potable), la restauration ou la **préservation des milieux naturels** et de leur biodiversité, la **demande sociale** de connaissances, les **vulnérabilités accrues** de la société.

Notons que l'on compte aujourd'hui en France Métropolitaine environ **3500** stations hydrométriques, principalement gérées par le Ministère de l'Environnement et par les opérateurs d'ouvrages hydro électriques ou d'irrigation. Plus de **80 %** sont télétransmises en temps réel. Cette densité (0,63/ 100 km^2) est **dans la moyenne de l'Europe occidentale**, de l'ordre de celle du Royaume Uni, supérieure à l'Espagne, mais inférieure à la Suisse ou l'Allemagne.

3. Comment mesure-t-on le débit des rivières ?

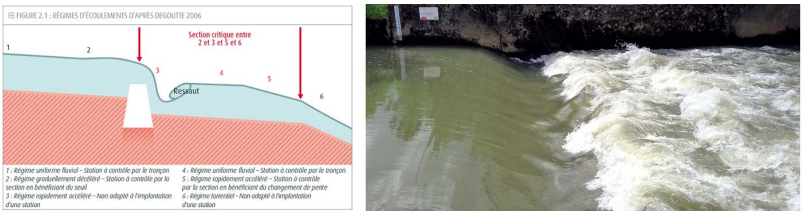

Figure 3. contrôle hydraulique en rivière ; à gauche, le schéma de principe ; à droite, un exemple en rivière. Remarquer la formation d'un régime d'écoulement torrentiel dès le passage du seuil, suivi d'un ressaut hydraulique producteur de remous et d'une grande perte d'énergie [Source : crédit photo EDF DTG]

La mesure directe du débit est une opération complexe qui ne peut être réalisée que ponctuellement. Sauf cas d'espèce très particulier, on ne peut pas réaliser un suivi direct et continu du débit. C'est la **hauteur d'eau** que l'on mesure en continu, après l'avoir au préalable reliée au débit par une **courbe de tarage**. C'est pourquoi, l'hydrométrie est une démarche en **4 étapes** :

la mesure continue des **hauteurs** en amont d'un **contrôle hydraulique** (voir figure 3), ou en autre endroit où une relation univoque hauteur-débit peut être établie,

la réalisation de **jaugeages** périodiques pour construire cette relation (**courbe de tarage**), permettant de convertir les hauteurs en débits,

le **tracé** de cette courbe de tarage et la **détection de ses évolutions**,

puis, après conversion des hauteurs en débit, l'analyse **critique des fluctuations spatiales et temporelles**, puis leur archivage.

3.1. Mesurer les hauteurs en continu

La mesure des hauteurs a pendant longtemps consisté en des lectures visuelles réalisées quotidiennement (ou à fréquence plus

rapprochée) sur des échelles graduées (Figure 4). Au fil du temps, le processus s'est automatisé par la mise en place —en complément de ces échelles de référence— de capteurs permettant de suivre les variations de hauteur à un pas de temps adapté aux fluctuations du **débit** (très réactif dans le cas d'un petit bassin torrentiel ; beaucoup plus lisse dans un grand bassin fluvial de plaine). Plusieurs générations de capteurs coexistent ainsi désormais sur les réseaux : dispositifs à flotteur, pneumatique, piézo-résistif, ultra son immergé, mesure différentielle de conductivité, etc….

Figure 4. Échelle sur le Niger à Mopti [Source : crédit photo LTHE]

Tous ces dispositifs sont placés **dans ou au contact avec l'eau** ; le **radar** (Figure 5) —apparu au tournant des années 2000— offre l'avantage d'être hors de l'eau (gage de **meilleure pérennité**, car **non soumis aux agressions** de l'eau, des sédiments & corps flottants en rivière) et **insensible à la température** (caractéristique qui fait défaut aux ultra sons émergés). Toutefois, la nécessité d'éloigner le radar de la berge (effets de bord) et la tache de réception de l'onde conditionnée par le guide d'onde peuvent néanmoins pénaliser la représentativité de la mesure par rapport à l'échelle de référence.

Figure 5. Mesure de niveau par radar émergé [Source : crédit photo EDF DTG].

3.2. Étalonner la courbe de tarage : les jaugeages

Les jaugeages périodiques sont menés sur toute la **gamme des débits** que peut atteindre la rivière, (tant en sécheresse, moyennes eaux, que crues), principalement par exploration du champ des vitesses ou dilution d'un traceur.

Le **jaugeage par exploration du champ de vitesses** (Figures 6 et 7) de l'écoulement s'est longtemps limité aux vitesses de surface (au moyen de "**flotteurs**", bâtons lestés suivant le courant). Des cartographies plus complètes **du champ des vitesses** sont désormais réalisées au moyen de capteurs de vitesse : **moulinets mécaniques** (Figure 6) —une hélice tournant proportionnellement à la vitesse locale du courant—, **électromagnétiques** —le déplacement de l'eau produisant une tension induite proportionnelle à la vitesse locale du courant (Principe de Faraday).

Figure 6. Moulinet hydrométrique mis en œuvre à la station de Grenoble Campus sur l'Isère [Source : crédit photo LTHE]

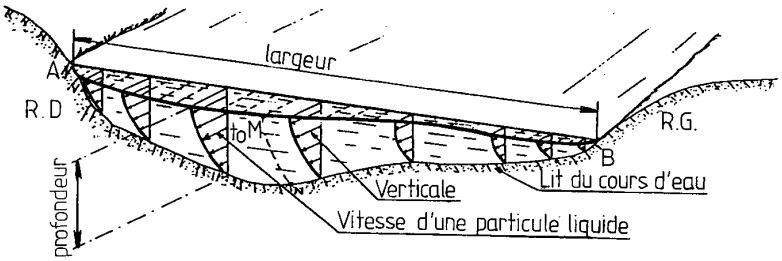

Figure 7. Principe de jaugeage par exploration du champ de vitesses. La carte de vitesses est tracée par des mises en station de 30 à 40 secondes à plusieurs profondeurs et sur plusieurs verticales.

Depuis le début des années 1990, les **profileurs ADCP** (Acoustic Doppler Current Profiler : dispositif venant de l'océanographie, basé sur l'effet Doppler) constituent un **véritable saut technologique** pour l'hydrométrie (Figure 8). Ils permettent de réduire **considérablement le temps de mesure sur site**, en particulier sur les grandes rivières, et sont désormais adaptés à des cours d'eau de petite taille (une profondeur minimale de 50 cm étant néanmoins requise).

Figure 8. La mesure de vitesse par l'ADCP repose sur le principe du Doppler pulsé : émission d'impulsions ultrasonores dans l'eau et analyse du décalage fréquentiel de l'écho rétrodiffusé par les particules en suspension. Le dispositif comporte généralement 3 ou 4 transducteurs émettant des faisceaux acoustiques divergents autour de la verticale, ce qui permet de mesurer le profil vertical des vitesses en trois dimensions. [Source : crédit photo EDF DTG]

Figure 9. A gauche : dispositif d'injection de rhodamine. A droite : entrée de la rhodamine dans le torrent. Le traceur (inoffensif vis-à-vis de la faune et la flore) ne colore pas l'eau. Sa dilution s'analyse ensuite par un fluorimètre (mesurant l'atténuation de sa fluorescence), aujourd'hui encore au laboratoire ; demain peut être directement sur le terrain (crédit photo EDF DTG)

Le **jaugeage par dilution** (figure 9) consiste à injecter dans le cours d'eau un **traceur** en solution et à suivre l'évolution de sa concentration au cours du temps. Lorsque la condition de bon mélange du traceur est assurée —et si absence de pertes d'eau dans le bief de dilution—, par **loi de conservation de la masse**, le facteur de dilution est directement proportionnel au débit de la rivière. Plusieurs générations de traceurs ont été historiquement utilisées, l'état de l'art actuel étant de privilégier les **traceurs fluorescents** (rhodamine, uranine) ou le **sel** de cuisine.

3.3. Relier hauteur et débit : la courbe de tarage

La **courbe de tarage,** relation entre hauteur et débit (figure 10)**,** constitue le maillon le plus **délicat**. Longtemps tracée manuellement, selon la seule expertise des opérateurs, la définition de cette courbe fait désormais appel à des **outils d'aide à la décision**, outils combinant approches statistiques, prise en compte d'incertitudes métrologiques sur les jaugeages, modèles hydrauliques.

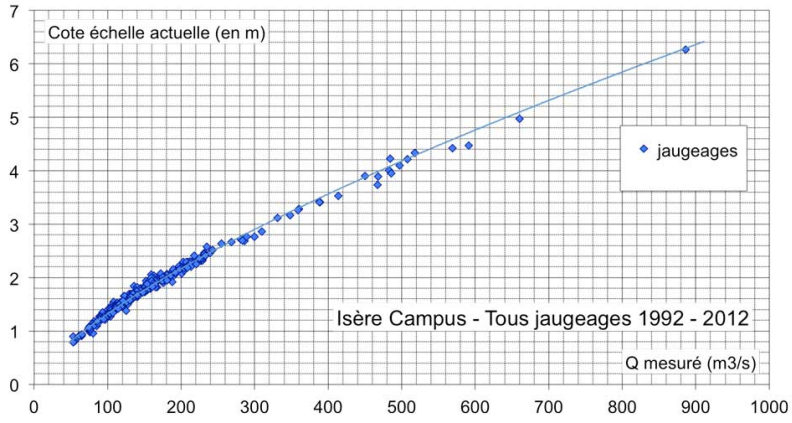

Figure 10. Courbe de tarage de la station de Grenoble Campus. Pour la plupart des stations en rivière, la courbe de tarage peut se modifier pour de multiples causes et ne tend jamais –en règle générale- vers une stabilisation. Ici, à Grenoble Campus, la courbe de tarage représentée est celle valable entre 1992 & 2012. Elle a été modifiée ensuite en raison de travaux réalisés sur les digues de l'Isère à partir de septembre 2012. La courbe évolue rapidement jusqu'en avril 2013 et semble s'être à nouveau stabilisée depuis [Source: crédit photo LTHE]

La relation hauteur-débit, si elle est réputée stable sur un laps de temps donné, **ne l'est pas forcément dans la durée, notamment lorsque le contrôle hydraulique n'est pas constitué par un ouvrage artificiel**. La végétation, l'intervention humaine, les crues —par les mécanismes associés de transport solide, érosion ou dépôt— modifient plus ou moins souvent le profil d'écoulement de la rivière. Le suivi de la courbe de tarage conditionne ainsi une véritable **stratégie de jaugeage**, à adapter tant temporellement (fréquence des jaugeages) qu'en fonction des états d'eau (étiage, moyennes eaux, crues). Le suivi et le tracé de la courbe de tarage constituent à ce titre **le cœur de métier de l'hydrométrie**.

L'état de l'art a récemment évolué grâce à des dispositifs à demeure qui permettent de **mesurer en continu la vitesse**, soit **en surface** (radar de vitesse), soit à demeure dans l'écoulement (**ultrasons** à temps de transit ou effet Doppler). Les principes de l'hydrométrie ne s'en trouvent pas fondamentalement changés : une **relation d'étalonnage hauteur, vitesse(s), débit reste à**

calibrer tout au long de l'exploitation du site de mesure. Ces dispositifs étaient d'ores et déjà mis en œuvre lorsqu'une relation unique entre hauteur et débit n'était pas vérifiée (cours d'eau réglé par de la navigation et/ ou soumis à marée), mais les évolutions technologiques en cours rendent moins onéreuse la diffusion de ce type d'installations.

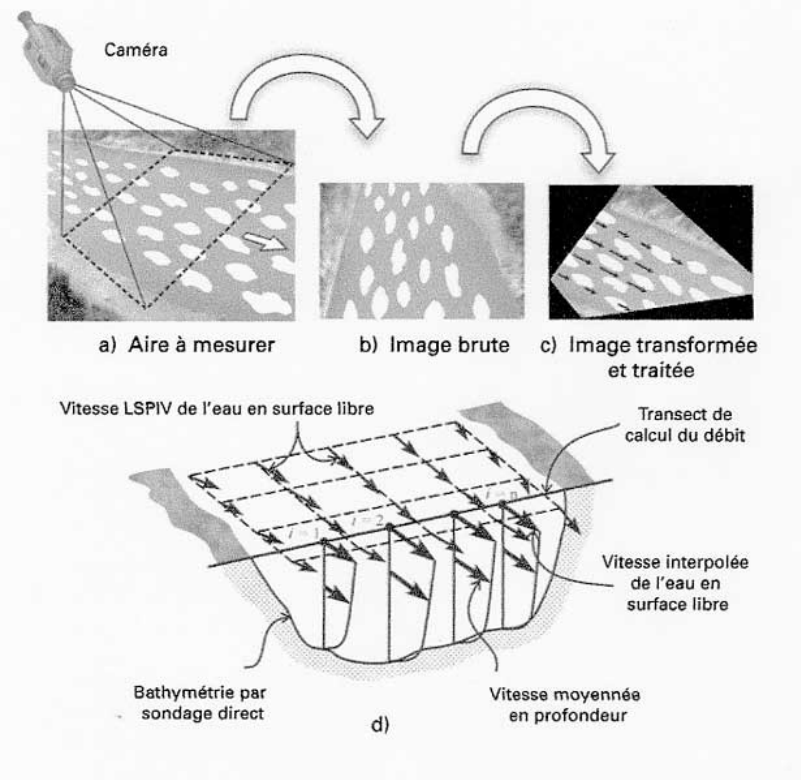

Figure 11. Principe de la LSPIV : a) ensemencement de corps flottants, b) enregistrement d'images, c) ortho rectification des images, d) calcul du débit à partir des mesures LSPIV de vitesse de surface (d'après Muste).

Les nouvelles technologies de l'image amènent une innovation prometteuse : le **traitement d'images vidéo** pour déterminer le champ des **vitesses de surface** d'une rivière (Figure 11). On exploite ici le **déplacement de tous corps solides** transportés en surface (brindilles, bulles, feuilles…) ainsi que les **turbulences de l'écoulement**. Cette technique est dérivée de la *Particle Image Velocimetry* (*PIV*) utilisée en laboratoire, mais pour une étude sur des objets de grande échelle de type rivière, d'où son nom de *Large-Scale PIV* (*LSPIV*). Celle-ci comprend :

l'enregistrement de **séquences d'images horodatées** de l'écoulement,

une **correction géométrique** des images pour s'affranchir des distorsions de perspective,

un **calcul du déplacement** des traceurs de l'écoulement grâce à une analyse statistique en corrélation des motifs.

Connaissant la géométrie de la section de rivière et supposant un modèle de distribution verticale de vitesses, on estime le **débit total à partir du champ de vitesses LSPIV**.

Cette technique d'avenir ouvre la voie à une **densification des mesures en crue** : le caractère fugace des épisodes, les difficultés d'accès (routes inondées), les conditions de sécurité (violence des écoulements) ne permettant pas aux équipes d'intervenir autant que nécessaire. Elle ne peut toutefois pas encore être mise en œuvre en cas de **mauvaise visibilité** (nuit, brouillard).

3.4. Vérifier la cohérence des données

La conversion des hauteurs en débit, la critique des résultats, l'archivage en base de données constituent le dernier volet du métier de l'hydrométrie.

Des **tests de cohérence** sont menés sur les **enregistrements à la station** (repérage des décalages & dérives de capteur, lissage

du signal brut, comblement des lacunes sur les périodes de défaut d'enregistrement) et par des **modèles hydrologiques** plus ou moins sophistiqués :

en **cohérence avec les autres sites de mesure** en amont et en aval,

en **référence à des historiques** d'ores et déjà constitués sur le site de mesure, par inter comparaison avec les années précédentes, recherche d'explications à partir de la mesure de la pluie, des influences connues (prélèvements d'eau, etc…)

Tout le processus est **itératif**, et donc peut conduire à **remettre en cause** la courbe de tarage en cours et donc redéfinir son tracé, voire la stratégie de jaugeage. Des informations obtenues **longtemps après l'occurrence de l'évènement** hydrologique (modélisation hydraulique, jaugeages de crues,…) peuvent amener à largement modifier les résultats publiés à une station. Il est courant d'admettre un délai de **dix huit mois à deux ans** pour la consolidation de l'information.

La **quantification des incertitudes** en hydrométrie a beaucoup progressé ces dernières années, mais reste un **champ d'investigations** pour le métier. On considère que sur les meilleures stations (c'est-à-dire, celles où la courbe de tarage peut bien être suivie à raison de moins de 4 ou 5 jaugeages par an), les débits courants —rencontrés 80 % du temps— sont en valeur consolidée à mieux que **5 %** près.

4. Quels enjeux aujourd'hui pour l'hydrométrie ?

Gardons à l'esprit que l'hydrométrie est un **processus intensif en main d'œuvre**, qui nécessite des déplacements sur le terrain et constitue une vraie **tâche d'artisan** associant métrologie, hydraulique et hydrologie. En conséquence, le **coût d'exploitation annuel d'une station** est souvent de l'ordre de grandeur du **coût d'investissement initial** pour création du point de mesure. L'hydrométrie est donc une tâche de **longue haleine**, où les à coups budgétaires pèsent fortement sur la qualité des données produites.

L'hydrométrie est également un processus **complexe**, car intervenant sur le milieu naturel, avec tous ses aléas associés, et où les **temps de maturation de la donnée peuvent potentiellement être longs**. Ainsi, entre une information donnée à chaud (voire ayant servi à prendre une décision) et une donnée consolidée après critiques, découvertes d'éléments nouveaux, des différences **significatives** peuvent apparaître (**du simple au double** pour une valeur de régime extrême, en crue ou sécheresse) et ceci plusieurs années après leur occurrence.

Enfin, l'hydrométrie est un **processus en devenir** : la mise à disposition de nouvelles **technologies d'imagerie** (LSPIV) et de **communication** (téléphonie, internet) va augmenter les flux de données collectées. Rapidement vont se poser les questions du **traitement de ces informations**, de leur **critique et homogénéisation**, de leur **conservation**, et des **compétences** accompagnant cette massification d'informations. Tout ceci répondant à une véritable demande sociale de **meilleure connaissance des milieux**, de **réduction de la vulnérabilité** aux aléas, dans les contextes actuels de dérèglement climatique et de préservation de la biodiversité.

photo de couverture: https://pixabay.com/fr/eau-s-%C3%A9coulant-%C3%A9claboussure-2130047/

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** LALLEMENT Christian (2021), Hydrométrie : mesurer les débits d'une rivière, pourquoi et comment ?, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=4307

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.