

Chapitre 04 : Mesure de débit

Introduction

Les débits des cours d'eau varient en fonction du temps. Certaines études nécessitent des mesures instantanées de ces débits ; on exécute alors des jaugeages aux instants choisis. Dans la plupart des cas, c'est l'évolution des débits en fonction du temps qui nous intéresse ; on installe alors des stations hydrométriques (appelées également stations de jaugeage).

1. Notion de débit instantané

Le débit instantané, Q , est le volume d'eau passant à travers la section d'un cours d'eau pendant une unité de temps

- Q : débit (en m^3/s)
- V : volume (en m^3)
- t : temps (en s)

En considérant la "surface mouillée" (S , en mètres carrés), définie comme la section du cours d'eau prise perpendiculairement à l'écoulement, le volume V correspond au produit de cette surface par une longueur dans la direction de l'écoulement (L en mètres).

La longueur L correspond ainsi à la distance parcourue par le courant durant une unité de temps. Le rapport de cette longueur par le temps t correspond donc à la vitesse moyenne du courant dans la section (V_{moy}) :

Le débit est donc donné par la relation :

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{S \times L}{t} = \frac{L}{t} \times S = v_{\text{moy}} \times S \quad (13)$$

2. Acquisition des débits en fonction du temps

Actuellement, il n'existe aucune technique opérationnelle qui permette de mesurer directement le débit en fonction du temps. Cette opération se fait généralement dans la pratique de la manière suivante :

- on enregistre en un point du cours d'eau (la station hydrométrique), la hauteur d'eau H en fonction du temps. Cet enregistrement $H(t)$ est appelé "limnigramme"

- A différents instants $t = t_1, t_2, \dots, t_n$, on pratique des mesures instantanées de débits $Q_{t1}, Q_{t2}, \dots, Q_{tn}$; ces mesures correspondent à des enregistrements de hauteur synchrone $H_{t1}, H_{t2}, \dots, H_{tn}$.
- Dans certaines conditions hydrauliques, comme le passage en "section critique", il existe une relation biunivoque entre la hauteur d'eau et les débits. Dans ces conditions, les différents jaugeages (Q_{ti}, H_{ti}) permettent d'établir la relation hauteur-débit appelée courbe de tarage : $Q(H)$.
- en combinant la courbe de tarage $Q(H)$ et le limnigraphe $H(t)$, on obtient aisément l'évolution du débit en fonction du temps $Q(t)$ appelé hydrogramme.

Cette vision est tout à fait idyllique car de nombreuses difficultés apparaissent au long des différentes étapes comme nous allons le voir.

2.1 Station limnimétrique

Généralement, une station est constituée d'une échelle limnimétrique, d'un ensemble de capteurs et d'appareils enregistreurs ou télétransmetteurs, d'une armoire et éventuellement d'un local technique.

Les stations sont le plus souvent reliées au téléphone via un modem, afin de pouvoir envoyer les informations de hauteur et être interrogées à distance.

L'échelle limnimétrique est une règle graduée, placée sur le bord du cours d'eau ou dans les canaux, le plus souvent en berge ou sur une pile de pont. Elle permet de mesurer la totalité du niveau d'eau d'une section, des basses eaux jusqu'aux hautes eaux. Elle est obligatoirement rattachée à un système universel de référence d'altitude. (*Fig :28*)



Figure 28 : Échelle limnimétrique

Le dispositif de mesure en continu de la hauteur est un limnigraphe. Il se compose de deux éléments distincts : un capteur destiné à effectuer la mesure et un enregistreur qui la mémorise. (*Fig : 29, 30*)

3.4.1 Différents types de capteurs



Figure 29 : Capteur radar crusoé



Figure 30: Capteur nilomètre

3.4.2 Différents types d'enregistreurs



Figure 31 : Différents type d'enregistreurs

L'enregistrement de la variation des hauteurs en fonction du temps se fait sur des diagrammes appelés limnigrammes. (*Fig : 32*)

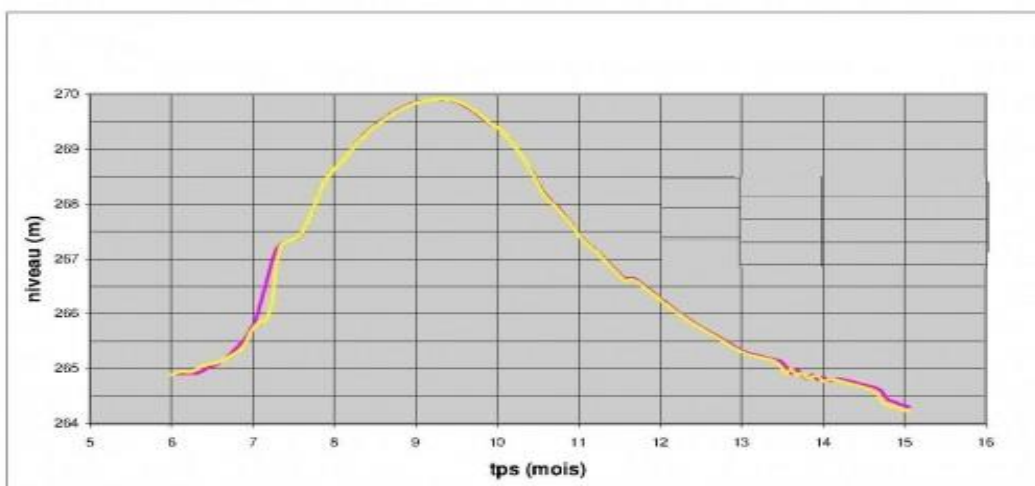


Figure 32 : Exemple de limnigramme

Les stations enregistrent donc la hauteur d'eau en continu, mais cette hauteur n'est significative qu'au droit de la station. En aval ou en amont de la station

cette hauteur ne sera plus la même en fonction du profil du cours d'eau. Il est donc important de connaître le débit.

Pour cela, les équipes de terrain effectuent régulièrement des mesures ponctuelles de débit, appelées jaugeages, décrivant ainsi tous les régimes hydrologiques (hautes, moyennes et basses eaux).

Chaque mesure de débit permet d'obtenir un couple (hauteur - débit). L'ensemble des couples forme un nuage de points obtenu en plaçant, sur un repère orthonormé, les couples hauteurs-débits résultant des jaugeages. L'ordonnée représente le débit de la rivière (en mètres cube par seconde) et l'abscisse représente la hauteur d'eau (en centimètres). Des lois mathématiques sont alors utilisées pour faire passer une courbe au plus près de tous ces points, cette courbe s'appelle la courbe de tarage.

3. Les méthodes de jaugeages

Un jaugeage est donc une mesure quasiment instantanée du débit d'un cours d'eau. Les techniques utilisées sont nombreuses et généralement complémentaires ; elles s'appuient sur des principes très différents selon les cas.

3.1 Réservoirs étalonnés

Cette technique simple consiste à mesurer le temps nécessaire Δt , pour remplir un récipient de volume V . On obtient le débit Q par la relation suivante : $Q = V/\Delta t$.

Cette méthode est surtout utilisée pour jauger des sources ou de très petits cours d'eau (débits de l'ordre de quelques litres par seconde au maximum). Le récipient peut être un seau de 10 litres ou un bac plastique de 100 litres par exemple. La seule condition est de pouvoir faire rentrer l'eau dans le récipient ce qui nécessite, soit une chute naturelle, soit de pouvoir aménager cette chute par une gouttière en plastique par exemple. (**Fig : 33**)



Figure 33 : Méthode de jaugeages par réservoir étalonné

3.2 Déversoirs

Le débit d'un cours d'eau peut être mesuré en utilisant des déversoirs sur des orifices normalisés. Ces techniques, adaptées surtout aux petits débits, utilisent les résultats de l'hydraulique classique mais dans des conditions bien souvent éloignées de celles rencontrées en laboratoire.

Différents types de déversoirs sont utilisés mais on rencontre principalement des déversoirs triangulaires dont la relation hauteur-débit théorique est :

$$Q = a h^b \quad (14)$$

En général on utilise :

$$Q = 1.32 \operatorname{tg}(\alpha/2) h^{2.47} \quad (15)$$

Dans la pratique, il est prudent de réaliser quelques jaugeages de contrôle permettant de déterminer les valeurs a et b dans les conditions réelles d'installation. Il en est de même pour les autres types de déversoirs rectangulaires avec ou sans contraction, à large seuil ou profilés.

Dans la quasi-totalité des cas, on utilise des déversoirs fixés à demeure dans le cours d'eau. Cette technique n'intéresse donc que des stations où l'on est disposé à réaliser un certain investissement.

Par ailleurs, l'installation d'un déversoir ne peut se faire que si la pente est suffisante pour permettre un relèvement de la ligne d'eau amont sans conséquences néfastes ; d'autre part, le ralentissement provoqué à l'amont entraîne des sédimentations qui peuvent modifier progressivement la relation hauteur-débit. (*Fig : 34, 35*)

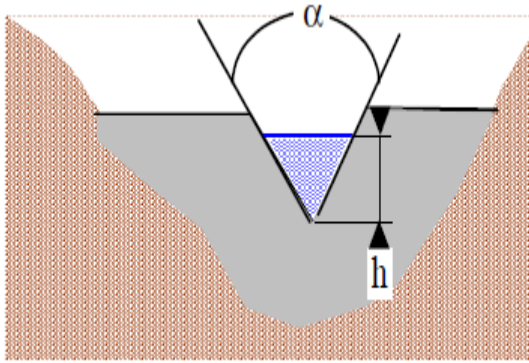


Figure 34 : Exemple d'un réservoir

Measuring Device (all sharp crested)	Views	Formula
Rectangular Weir (without contraction)	<p>Top view</p>	$Q = 3.33 LH^{3/2}$
Rectangular Weir (with contraction)	<p>Top view</p> <p>Side view</p>	$Q = 3.33(L - 0.2H)H^{3/2}$
Trapezoidal Weir	<p>End view</p>	$Q = 3.37 LH^{3/2}$
90° Triangular Weir	<p>End view</p>	$Q = 2.49 H^{5/2}$

Figure 35 : Equations du débit pour différents types de déversoirs

3.3 Jaugeages par dilution

Le principe général du jaugeage par dilution est simple. On injecte dans une section I, un traceur à une concentration C_1 ; en un point de prélèvement P situé en aval, on prélève un échantillon d'eau de la rivière et l'on détermine sa concentration C_2 en traceur. Il est alors aisé d'établir la relation entre le débit Q

du cours d'eau et les concentrations $C1$ et $C2$, soit par l'égalité des flux, soit par la conservation des masses entre les points P et I selon les procédés d'injection. (Fig : 36)

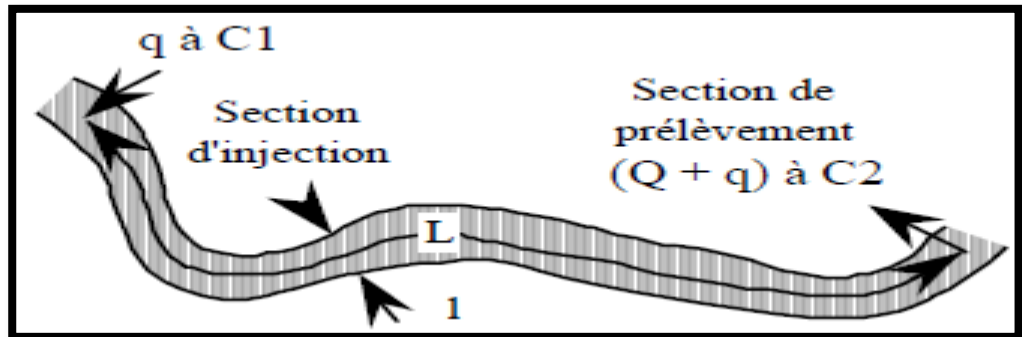


Figure 36 : Exemple Jaugeages par dilution

3.4.3 Courbe de tarage

La courbe de tarage évolue dans le temps et des mesures ponctuelles de débit peuvent s'écarter de la courbe idéale, on parle alors de détarage, comme par exemple au cours de la période où la végétation aquatique pousse, faisant augmenter les hauteurs mais pas les débits. Des travaux réalisés sur une rivière, comme un curage, peuvent également rendre une courbe de tarage caduque ou la modification du lit de la rivière suite à une crue. (Fig : 37)

Une courbe de tarage est donc valide d'une date à une autre date.

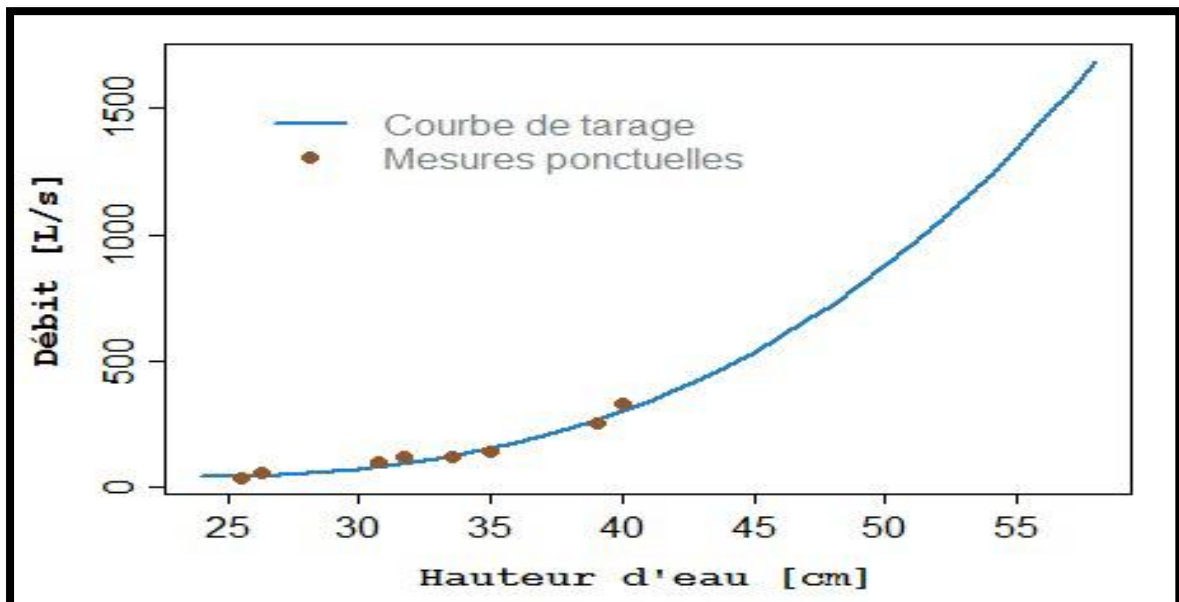


Figure 37 : Exemple de courbe de tarage

3.5 Le jaugeage au moulinet

Le jaugeage d'un cours d'eau consiste à mesurer la vitesse du courant. Cette vitesse varie latéralement d'une berge à l'autre et verticalement de la surface de l'eau au fond du lit. C'est pourquoi pour chercher la vitesse moyenne du courant, il faut faire plusieurs mesures en différents points de la section mouillée. (*Fig : 38*)

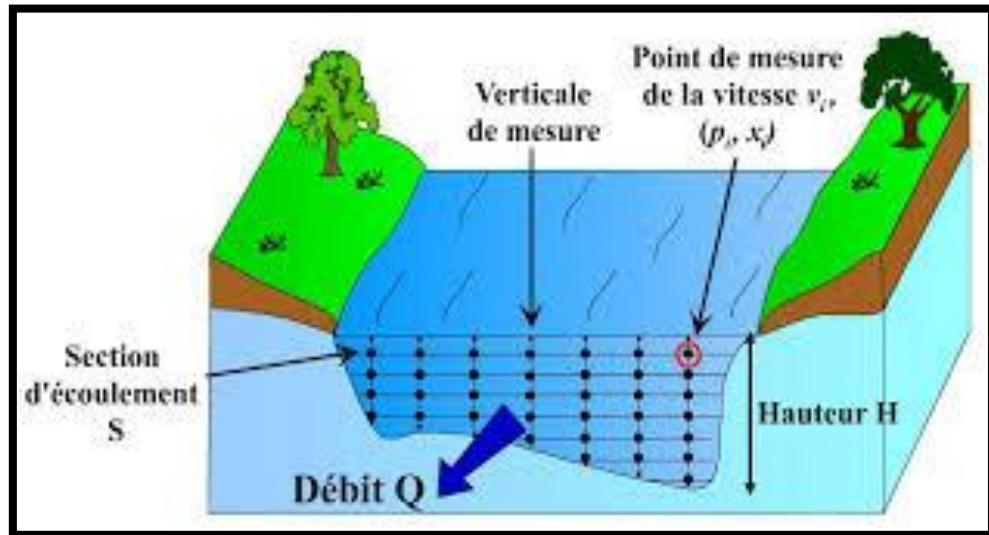


Figure 38 : Exemple de jaugeage par moulinet

3.5.1 Le matériel de mesures

La chaîne de mesures comporte différents éléments que nous allons étudier successivement.

Les capteurs (les hélices)

Le paramètre à mesurer est la composante normale à la section de la vitesse de l'eau. Le capteur le plus utilisé est une hélice. Si on introduit cette hélice dans l'écoulement, la vitesse longitudinale de l'eau va provoquer la rotation de l'hélice. Théoriquement, la relation entre la vitesse de rotation n (en tours/seconde) et la vitesse de l'eau V (en m/s) ne dépend que du pas p de l'hélice :

$$V = n p \quad (16)$$

Dans la pratique, on s'éloigne de cette courbe idéale du fait des frottements et des perturbations des vitesses dues au support de l'hélice. L'étalonnage est fait au laboratoire dans les conditions réelles d'emploi et la relation $V [f(n)]$ est du type :

$$V = a n + b \quad (17)$$

Où a représente le pas réel et b la vitesse de démarrage (ou vitesse de frottement). Parfois même, on est amené à utiliser deux formules, suivant les plages de vitesses : par exemple, une hélice de pas nominal 0,25 m peut avoir des formules d'étalonnage suivantes :

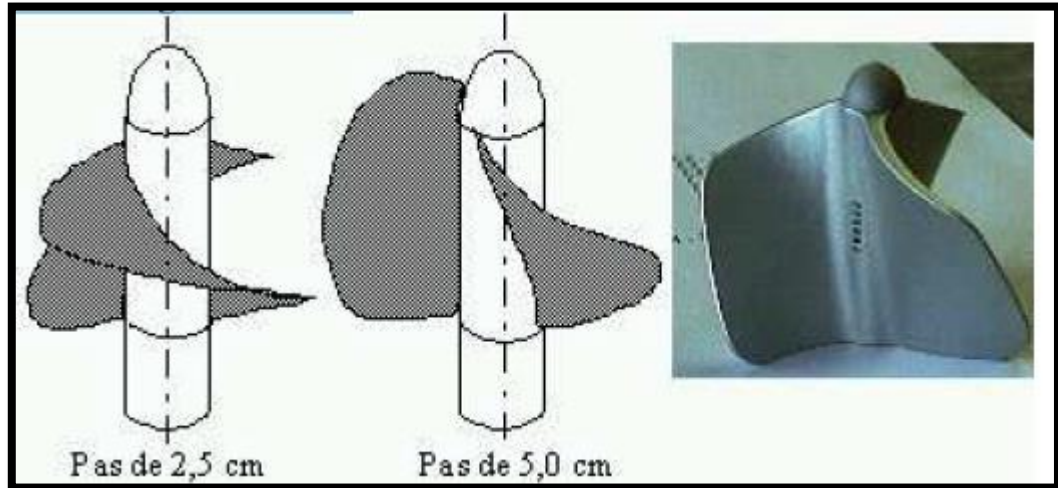


Figure 39 : Les hélices

$$n < 0,59 \quad V = 0,2345 n + 0,017 \quad (18)$$

$$n > 0,59 \quad V = 0,2515 n + 0,007 \quad (19)$$

La sensibilité d'une hélice dépendant de son pas, on utilisera pour mesurer des faibles vitesses, des hélices à faibles pas et pour des grandes vitesses, des pas plus longs.

Il existe par ailleurs une vitesse limite supérieure liée aux capacités d'enregistrement du nombre de tours par seconde.

3.5.1.1 Traitement du signal (les moulinets)

Les moulinets ont pour objet de transformer le mouvement de rotation de l'hélice en impulsions électriques aisément transférables et enregistrables.

Le principe en est simple ; un axe auquel est fixée l'hélice est entraîné dans son mouvement de rotation. La partie arrière de cet axe porte, soit une vis sans fin qui par un système d'engrenage ferme un circuit électrique à chaque tour, soit un aimant dont la rotation provoque la fermeture d'un contacteur magnétique. L'axe du moulinet est porté par des paliers de haute précision à très faible frottement. (*Fig : 40*)



Figure 40 : Exemple d'un moulinet

3.5.1.2 Enregistrement (les compteurs)

Les compteurs ont pour objet de totaliser les impulsions électriques émises par le moulinet. La cadence maximale d'enregistrement est généralement de 10 hHz (10 impulsions/seconde) ; les modèles les plus récents montent à 20 Hz.

Parmi les différents modèles, on peut citer :

3.5.1.3 Les totalisateurs

Un même bouton sert à la mise en route et à l'arrêt du comptage. Un affichage mécanique ou à cristaux liquides, donne le nombre d'impulsions enregistrées et un bouton permet la remise à zéro. Ce type d'appareil est donc utilisé avec un chronomètre que l'on met simultanément en route.

3.5.1.4 Les chrono-compteurs

A partir de l'appareillage de base précédent, on adjoint un chronomètre dont la commande est asservie à celle du compteur. Il ne reste donc qu'un seul bouton. La première pression met en route le compteur et le chronomètre; la deuxième pression les arrête simultanément pour permettre la lecture du nombre d'impulsions i et du temps Dt ($n = i/Dt$) ; la troisième remet le tout à zéro.

3.5.1.5 Les compteurs à présélection

Une amélioration a encore été apportée en permettant le choix de la durée Dt de la mesure (présélection du temps) ou du nombre i d'impulsions à enregistrer (présélection d'impulsions).

Ayant fait sa présélection, la première pression sur le bouton met le compteur en marche et il s'arrête automatiquement soit au bout de Dt en affichant le nombre d'impulsions enregistrées, soit au bout de i impulsions, en affichant le nombre Dt . La deuxième pression remet les compteurs à zéro.

Tous ces modèles comportent une alimentation électrique, soit par piles sèches, soit par batteries rechargeables.

3.5.1.6 Les supports

Nous avons vu quels étaient les trois éléments principaux de la chaîne de mesures ; reste maintenant à positionner le capteur à différentes profondeurs suivant une verticale. Deux supports sont possibles. (**Fig : 41**)



Figure 41 : Exemple d'un support

Références bibliographiques

J.P. Laborde, 2009.cours éléments d'hydrologie de surface université de Nice - Sophia Antipolis, 202 pages.