

Chapitre 4 : Hydrométrie

Mesure des paramètres de l'écoulement

Les débits : journaliers, mensuels, annuels et interannuels

Introduction

Dans la plupart des études le débit des cours d'eau est la variable dépendante; ce dernier variant en fonction du temps. Par conséquent certaines études nécessitent des mesures instantanées des débits; on exécute alors des jaugeages aux instants choisis. Mais dans la majorité des cas, c'est l'évolution du débit dans le temps qui nous intéresse; on installe alors des stations hydrométriques ou de jaugeage. En pratique il est difficile d'obtenir le débit (Q) d'une manière continue ou directe. Et à ce jour, il n'existe pas de méthode opérationnelle (c'est-à-dire facile à utiliser et pas chère) qui permette mesurer les débits.

La mesure se fait en deux temps :

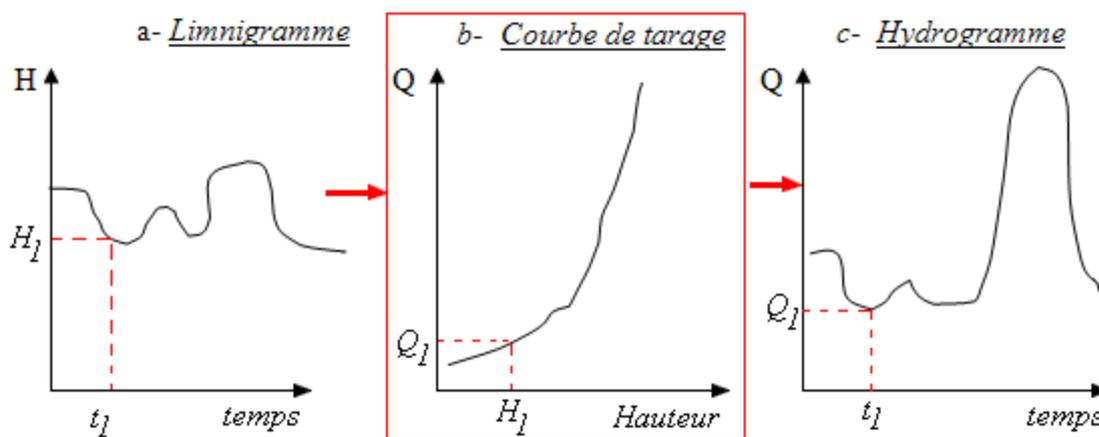
- Mesure en un point du cours d'eau de la variation de la hauteur H_i de l'eau en fonction du temps. La courbe obtenue est appelée limnigramme (enregistrement de la hauteur d'eau en fonction du temps: **LIMNIGRAMME** $H = f(t)$).
- Mesure aux mêmes intervalles de temps t_1, t_2, \dots, t_n des débits Q_1, Q_2, \dots, Q_n . La mesure du débit est appelée jaugeage.

Les couples Q_i, H_i permettant d'établir la relation hauteur-débit appelée courbe de tarage (la courbe représentative de la relation $Q=f(H)$).

La combinaison de la courbe de tarage $Q(H)$ et le limnigramme $H(t)$ permet d'obtenir l'évolution du débit en fonction du temps $Q(t)$. La courbe représentative ainsi obtenue est dite "**HYDROGRAMME**".

Donc l'hydrogramme est la courbe représentative des variations du débit Q en fonction du temps t en un point du cours d'eau.

La figure ci-dessous schématise le processus d'obtention de l'hydrogramme à partir du limnigramme.



Acquisition des débits dans un cours d'eau

1. Définition de l'hydrométrie

Les techniques de mesure des paramètres caractérisant un écoulement dans un cours d'eau naturel ou artificiel ou encore dans une conduite sont regroupées sous le terme « hydrométrie ». Cependant, l'hydrométrie comprend la méthodologie et la technologie de la mesure des débits et des hauteurs d'eau dans les milieux suscités.

2. Quoi mesurer dans un cours d'eau?

La **limnimétrie** : consiste à **mesurer** la **côte** de la surface d'eau **libre** « H ». Cette dernière est exprimée en **mètre** et relevée en **lisant directement** la valeur **H** sur une échelle **limnimétrique**.

La **débitmétrie** : c'est la **mesure** du **volume** d'eau qui traverse une **section droite** d'un cours d'eau pendant une **unité** de **temps**. Elle est exprimée en m^3/s ou l/s

3. Le réseau hydrométrique

Le **réseau hydrométrique** est **l'ensemble** des **stations** ou des **sites** permettant de mesurer la **hauteur** d'eau « H » et/ou le **débit d'écoulement** d'un cours d'eau, et ce, de façon **épisode** ou **discontinue**.

Le réseau hydrométrique peut être composé de :

- **Sites de jaugeage** : c'est les **lieux** des mesures **ponctuelles** de débit, de **façon régulière** ou **pas** dont **l'intervalle** de temps **séparant** deux **mesures** va de 15 mn pour les petits talwegs à quelques heures pour les grands oueds et rivières.
- **Stations limnimétrique et limnigraphiques** : s'il s'agit des **mesures ponctuelles** de manière **discontinues** de la **hauteur** d'eau d'un oued, on parle d'une **station limnimétrique**, cependant, si cette **mesure** se fait de **façon continue** par un appareil **enregistreur**, on parlera d'une station **limnigraphique**. A coté de cette dernière, il existe une échelle limnimétrique fixe dotée de **graduations centimétrique** permettant le contrôle des observations données par l'appareil.
- **Stations de jaugeage** : à ce niveau, on effectue des mesures **continues** de débit qui s'écoule dans le cours d'eau.

4. Mesure des hauteurs d'eau ou DU NIVEAU D'EAU (mesures limnimétriques) :

Il existe différents **principes de mesures physiques**.

L'échelle limnimétrique est toujours utilisée comme référence pour contrôler les appareils de mesure continue.

Au cours des années, différentes techniques de mesure ont été développées. Les plus fréquemment utilisés **sont le flotteur**, la **sonde à pression**, la **technique à ultrason** et le **radar**.

On distingue des principes de **mesure directs et indirects**. Les mesures **directes** mesurent une **hauteur** d'eau tandis que les principes de mesure **indirects** mesurent une **grandeur physique proportionnelle** à la **hauteur**, en général une **pression hydrostatique**.

4.1 Mesure manuelle

Le niveau d'eau à un point spécifique d'un cours d'eau est traditionnellement mesuré à l'œil à l'aide d'une échelle limnimétrique fixée au bord de l'eau.

Les désavantages de cette méthode sont la nécessité d'un grand nombre de personnel et l'acquisition de données exclusivement ponctuelles.

4.1.1. Le limnimètre

C'est un **dispositif** de base permettant de **lire** le **niveau** d'eau d'un cours d'eau. Souvent, il correspond à une **échelle** en **métal**, **graduée** et **fixée verticalement** dans le cours d'eau dont le point de départ (valeur zéro) doit être placé sur le point le plus bas qui correspond au creusement maximum du lit dans la section de contrôle. En conséquence, on évite les valeurs négatives de la hauteur d'eau.



Fig. 1. Le limnimètre.

4.2. Mesure continue

Contrairement à la mesure manuelle, les limnigraphes permettent des mesures continues, enregistrées sur papier ou de manière digitale.

4.2. Le limnigraphe:

Cet appareil permet d'enregistrer les niveaux d'eau d'un cours d'eau en fonction du temps. Les principaux types sont :

4.2.1. Le limnigraphe à flotteur

C'est avec cet appareil, un flotteur est maintenu à la surface d'eau à l'aide d'un câble, une poulie et un contre-poids. La fluctuation de la surface d'eau est traduite par le mouvement du flotteur et puis enregistrée sur un tambour rotatif (un tour par jour, par semaine ou encore par mois selon le choix du gestionnaire de la station). La précision de ce type d'appareil est de l'ordre de 5 mm.

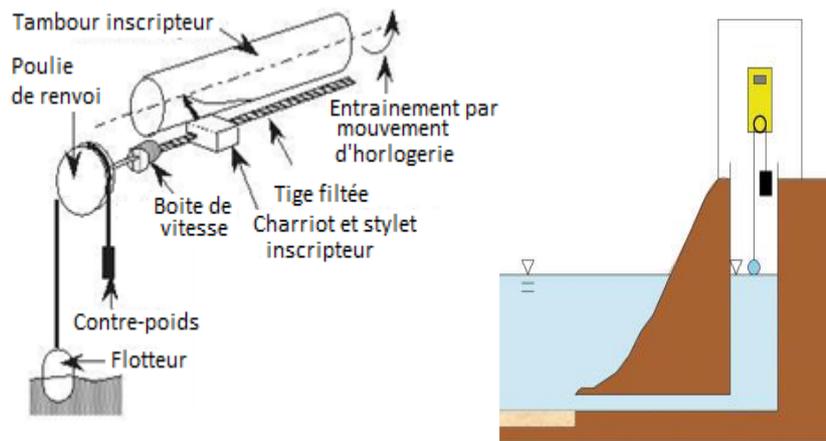


Fig. 2. Le limnigraphe à flotteur

4.2.2. Le limnigraphe à pression "bulle à bulle"

Dans cet appareil, on mesure la variation de la pression due aux changements du niveau d'eau. Il dispose d'une bonbonne de gaz comprimé, un dispositif de contrôle de pression et un tube immergé lié à la bonbonne de gaz. On envoi un débit d'air constant sous pression au fond du cours d'eau. La pression de l'air dans le tube est contrôlée par un manomètre à mercure, installé dans cet appareil. Cette pression est proportionnelle à la hauteur d'eau au-dessus de la prise installée dans le cours d'eau.

4.2.3. Les limnigraphes électroniques :

Avec ce type d'appareil, la mesure se fait automatiquement à l'aide des capteurs électriques tel que le capteur à ultrasons.

4.2.4. Mesure indirecte par système pneumatique

Par une fine conduite synthétique de l'azote ou de l'air comprimé est perlé dans l'eau. Chaque changement du niveau d'eau correspond à un changement de la pression mesurée par un capteur de mesure de pression différentielle.

Ce système est utilisé pour la mesure du niveau des eaux de surface ainsi pour la mesure du niveau des nappes souterraines.



4.2.5. Radar

Le radar est un capteur qui permet une mesure du niveau d'eau sans contact avec les eaux de surface. Son installation aisée se fait soit sur un pont soit sur une potence surplombant le plan d'eau.

Le radar émet des ondes électromagnétiques perpendiculairement au plan d'eau et analyse les ondes réfléchies pour calculer la distance entre le plan d'eau et le capteur



5. La mesure des débits

Le débit **instantané**, noté **Q**, **correspond** au **volume** d'eau **traversant** une **section droite** d'un cours d'eau pendant une **unité** de temps. Il est donné par la formule suivante :

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{Avec : } Q : \text{débit (en m}^3/\text{s)}$$
$$V : \text{volume (en m}^3)$$
$$t : \text{temps (en s)}$$

5.1. Méthode de mesure de débit (Les techniques de jaugeage) :

Par définition, un **jaugeage** est une **mesure instantanée** du **débit** d'un cours d'eau. Les particularités du cours d'eau prescrivent la méthode à utiliser. Les techniques utilisées sont nombreuses et s'appuient sur des principes différents.

5.1.1. La méthode volumétrique ou jaugeage capacitif

La méthode la **plus précise** sur les **faibles débits** (50 à 100 l/s au maximum) est la mesure dite "**à capacité**". Nécessitant au plus **deux opérateurs**, un **réceptacle** et un chronomètre, elle s'applique à un flux faible et canalisé. Le réservoir étalonné est donc un réceptacle dont le volume (V) est préalablement connu. La mesure consiste à déterminer le temps (t) nécessaire pour remplir ledit réceptacle. Le débit sera alors donné par: $Q = \frac{V}{t}$



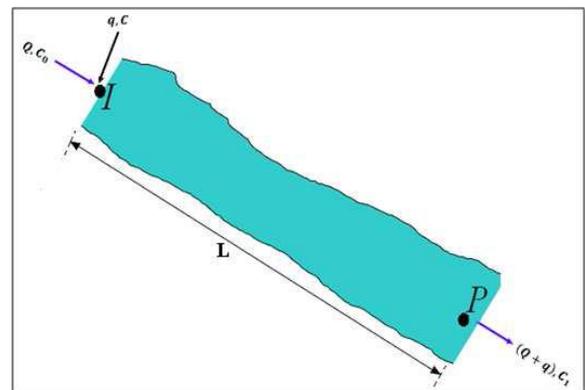
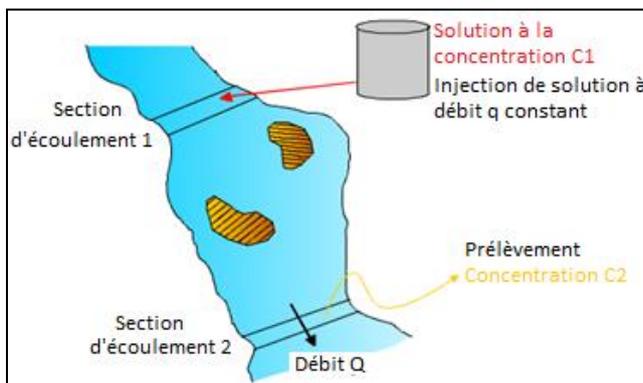
5.1.2. Les méthodes physico-chimiques

Elles correspondent en général à l'injection d'un corps en solution dans le cours d'eau, et à suivre l'évolution de sa concentration au cours du temps. Ce sont appelées aussi les méthodes **chimiques** ou par **dilution**.

L'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) recommande dans son "*Guide to Hydrometeorological Practices*" ce type de jaugeage à chaque fois que les méthodes conventionnelles ne pourraient être employées au site considéré (cas des profondeurs faibles et cas des écoulements torrentiels, pentes fortes et écoulement turbulent etc.).



Le principe du jaugeage par dilution est très simple. Au droit d'une section d'un tronçon de cours d'eau "I" on injecte un traceur ayant une concentration $[C_1]$. En un point de prélèvement "P", situé à l'aval, on effectue un ou plusieurs prélèvements d'échantillons d'eau et l'on détermine les concentrations $[C_2]$ en traceur. Il devient alors facile d'établir une relation entre le débit (Q) du cours d'eau et les concentrations $[C_1]$ et $[C_2]$ selon le mode d'injection, soit du principe de continuité (égalité des flux), soit du principe de conservation de masse entre les sections I et P.



$$qC_1 = (Q + q) C_2 \Rightarrow Q = (C_1/C_2 - 1) q$$

Caractéristiques du traceur

Il existe plusieurs types de traceurs. Toutefois il est recommandé d'utiliser le traceur possédant les propriétés suivantes:

- Facilement soluble dans l'eau à la température ambiante,
- Chimiquement stable en solution,
- Inoffensif à la communauté biologique du cours d'eau,
- Peu coûteux et facilement détectable par des procédés ou moyens simples,
- Non adsorbable par les matières en suspension ou au contact des rives de l'oued,
- Absent ou préexistant à faibles concentrations dans l'eau.

Exemples de traceurs utilisés en hydrologie

Dans la pratique on utilise, selon les conditions citées plus haut, les produits facilement mesurables suivants:

- *Conductimétrie* : Chlorure de sodium (NaCl ou sel de table),
- *Colorimétrie*: Bichromate de sodium (Na₂CrO₄),
- *Fluorométrie*: Fluorescéine, Rhodamine B, Rhodamine W et autres colorants synthétiques,
- *Radiométrie*: Or radioactif (Au¹⁹⁸), Sodium radioactif (Na²⁴), autres radio-isotopes.

5.1.3. Les méthodes d'exploration du champ de vitesse

Ces méthodes font appel à un **matériel spécifique** tel que le **moulinet**, la **perche**, etc., et un personnel qualifié. Dans ces méthodes, on **détermine** la **vitesse de l'écoulement** en **différents points** de la **section**, tout en **mesurant** la **surface** de la **section mouillée**. Les jaugeages au moulinet et au flotteur font partie de cette classe de méthode, et seront détaillés ultérieurement.



5.1.3.1. Le jaugeage par exploration du champ de vitesse

Dans une **section transversale** d'un cours d'eau, la **vitesse d'écoulement** n'est pas **uniforme**. Il est, alors, **recommandé** de procéder à des **mesures de vitesse** en plusieurs points de la **section** considérée **selon** des **verticales espacées** sur la **largeur** du cours d'eau. On fait donc une exploration du champ de la vitesse sur une section transversale du cours d'eau.

Le débit Q s'écoulant à travers la section S peut être calculé par : $Q = V . S$ avec : Q en m³/s, S en m² et V : vitesse moyenne en m/s perpendiculaire à S .

Le plus souvent, les flotteurs et les moulinets sont utilisées pour mesurer la vitesse d'écoulement.

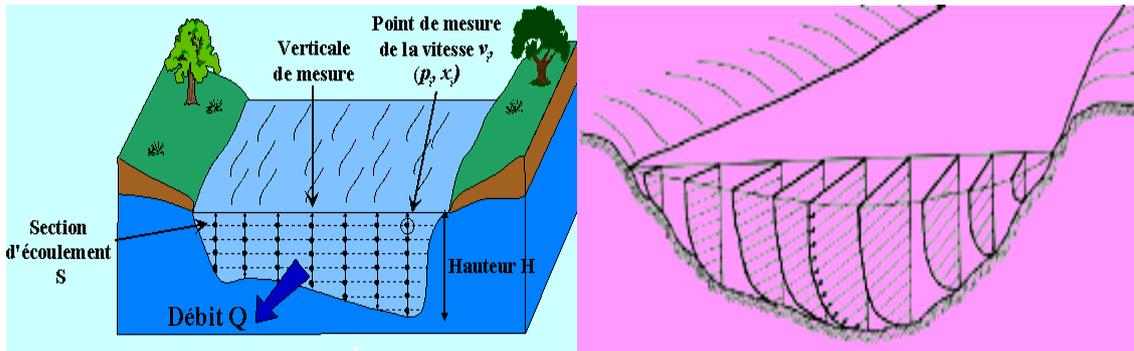


Fig.3. Débit et champ des vitesses à travers une section (à gauche), Débits unitaires q pour chaque verticale (à droite).

Jaugeage au moulinet

Principe de la méthode

Étant donnée une section droite d'un cours d'eau ; le débit est défini comme le flux du vecteur vitesse à travers cette section. Sur une section élémentaire dA (figure 6), le débit correspondant sera :

$$dQ = v \times dA$$

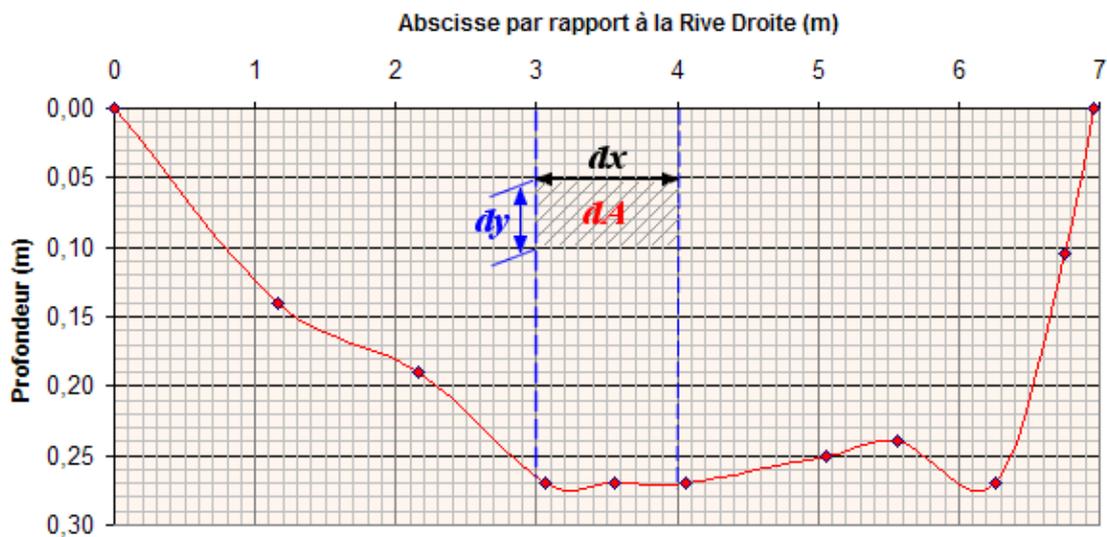


Schéma d'une section élémentaire de mesure

Le débit total à travers la section du cours d'eau A est :

$$Q = \int_{RD}^{RG} v \times dA$$

Où RD et RG désignent respectivement, la rive droite et la rive gauche de la section considérée.

Le jaugeage au moulinet, appelé également *jaugeages par exploration du champ des vitesses*, consiste à étudier la fonction $v(x, y)$ en échantillonnant suivant différentes valeurs de la largeur (x) et de la profondeur (y) de la section mouillée.

Généralement, on fixe différentes *abscisses* (appelées *verticales*) x_1, x_2, \dots, x_i et sur chacune des abscisses (x_i) on mesure, à différentes profondeurs $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ij}$ la vitesse $v(x_i, y_{ij})$. Cette technique est dite *jaugeage point par point*.

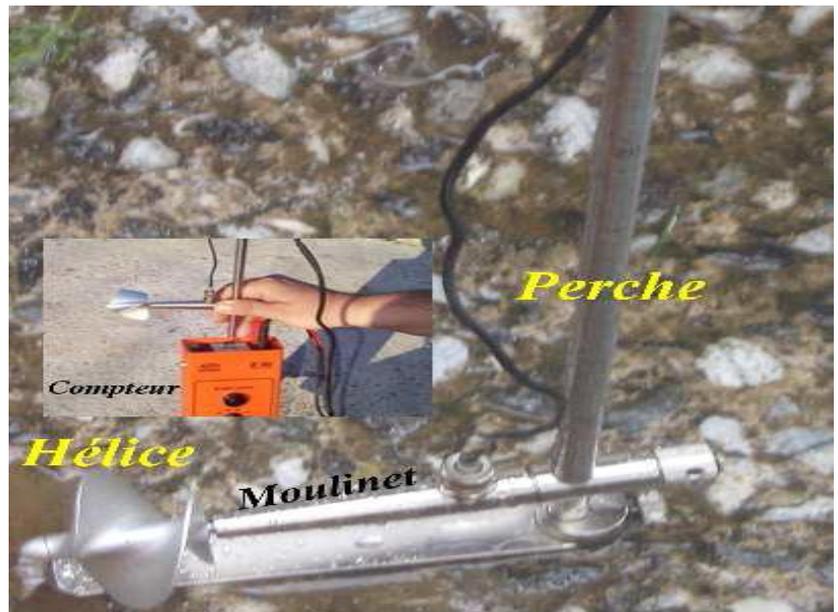
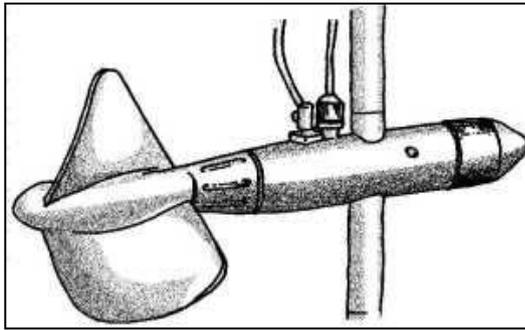
D'une manière plus simple, la mesure du débit par cette méthode exige la détermination des vitesses ponctuelles en nombre suffisant pour permettre le calcul d'une vitesse d'écoulement

moyenne (V) dans la section du cours d'eau considérée. Le débit transitant à travers cette section est alors :

Mesure à l'aide d'un moulinet ou jaugeage au moulinet

Dans ce cas, on utilise de **moulinets** à **hélice**, à **axe horizontal**. Le moulinet **dispose** d'un élément appelé **corps** du **moulinet** contenant un **axe horizontal** sur lequel **tourne** une **hélice**. Des **impulsions** produites par la **rotation** de cette hélice sont **décelées** et **comptabilisées** par un **compteur** attaché au **corps** du moulinet.

L'**émergence** du moulinet **dans** le **cours** d'eau se fait **face** au **courant**. La **vitesse** de **rotation** de l'hélice est liée, par une relation, à la **vitesse locale** d'écoulement.



Appareillage de jaugeage au moulinet

Matériel de mesure

L'appareillage de mesure de la **vitesse d'écoulement** à l'aide de **moulinet** comporte différents éléments à savoir (figure) :

- Les hélices :

Chaque **hélice** est **caractérisée** par son **diamètre** et son **pas** dont ce **dernier** correspond à la **distance parcourue** par l'eau pour **générer** un **tour** de l'hélice. Lorsqu'on introduit une hélice dans l'écoulement, la vitesse longitudinale de l'eau provoque la rotation de cette hélice.

Théoriquement, la relation entre la **vitesse de rotation** n , exprimée en tours (ou révolutions) par seconde et la vitesse de l'eau v en m/s est du type :

La vitesse d'écoulement et la vitesse de rotation de l'hélice sont liées par la formule suivante :

$$V = a \cdot n + b \quad \text{dite « courbe d'étalonnage de l'hélice » avec}$$

V : vitesse du courant m/s ;

a : pas de l'hélice en m ;

n : nombre de tours d'hélice par seconde ;

b : vitesse de frottement ou vitesse de démarrage.

Les valeurs de a et de b sont données par le fabricant. Suivant les plages des vitesses, on est parfois obligé d'utiliser deux relations pour la même hélice.

La sensibilité d'une hélice dépend de son pas. Pour mesurer les faibles vitesses, on utilise des hélices à faible pas et inversement

Diamètre (m)	Pas nominal (m)	Vitesse min (m/s)	Vitesse max (m/s)
0.03	0.05	0.050	0.50
	0.10	0.055	1.10
0.05	0.05	0.025	0.50
	0.10	0.030	1.00
	0.25	0.035	2.50
	0.50	0.060	5.00
0.08	0.125	0.060	1.25
1.00	0.250	0.040	6.00
1.25	0.25	0.05	2.50
	0.50	0.06	5.00
	1.00	0.08	10.00

Tableau. Caractéristiques des hélices

Les hélices sont réalisées le plus souvent en alliage léger mais il existe des hélices en plastiques dont la précision est très satisfaisante (erreur < 1 %).

- les moulinets

Les moulinets ont pour objet de transformer le mouvement de rotation de l'hélice en impulsions électriques facilement transférables et enregistrables. L'ensemble du moulinet est généralement réalisé en acier inoxydable.

- les compteurs

Les compteurs totalisent les impulsions électriques émises par le moulinet à une cadence maximale d'enregistrement de l'ordre de 10 à 20 Hz (impulsions/s). Tous les compteurs nécessitent une alimentation électrique.

- les perches

Afin de positionner l'ensemble *hélice-moulinet* à différentes profondeurs suivant une verticale on a plusieurs types de supports : perches, micro perches et saumons.

La perche est un support cylindrique gradué (diamètre : 9 à 30mm) maintenu verticalement dans l'écoulement. Un coulisseau coaxial permet de déplacer le moulinet suivant la verticale. Ce qui permet de réaliser des jaugeages point par point uniquement.

Le **saumon** est un **lest** profilé dont le poids varie entre 5 et 150 kg. Il porte à sa partie amont le moulinet et son hélice. Un empennage à sa partie arrière permet son orientation dans le sens du courant. Il est suspendu par un câble électro porteur à un treuil (figure 8). Ce câble sert à la fois à soutenir le saumon, mais aussi à transmettre les impulsions électriques en provenance du moulinet.

Le treuil, généralement à manœuvre manuelle, comporte un compteur indiquant la longueur du câble lâchée ce qui permet de mesurer les profondeurs par rapport à la surface. La descente du saumon peut être manuelle.



Fig. Saumon

suspendu par un câble.

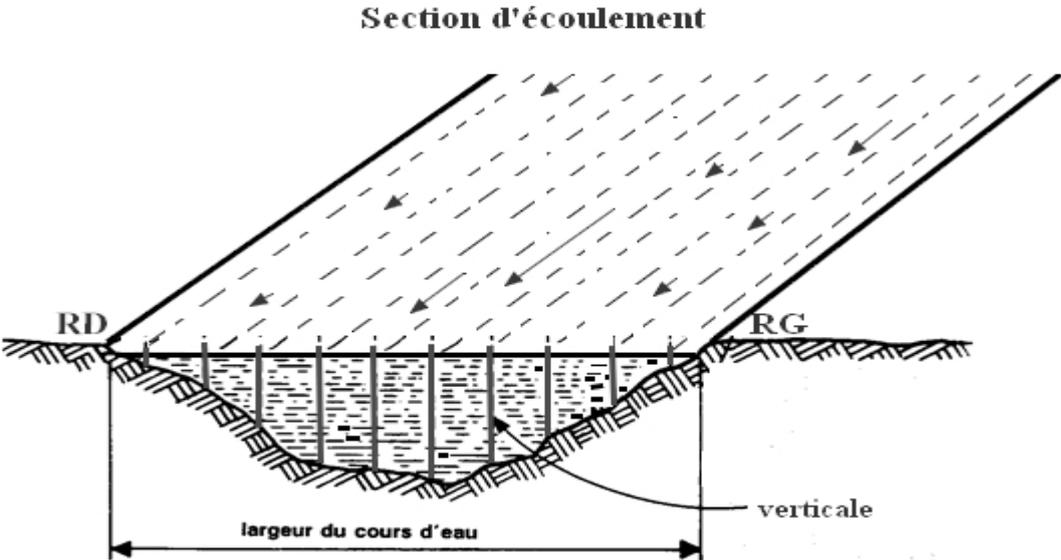
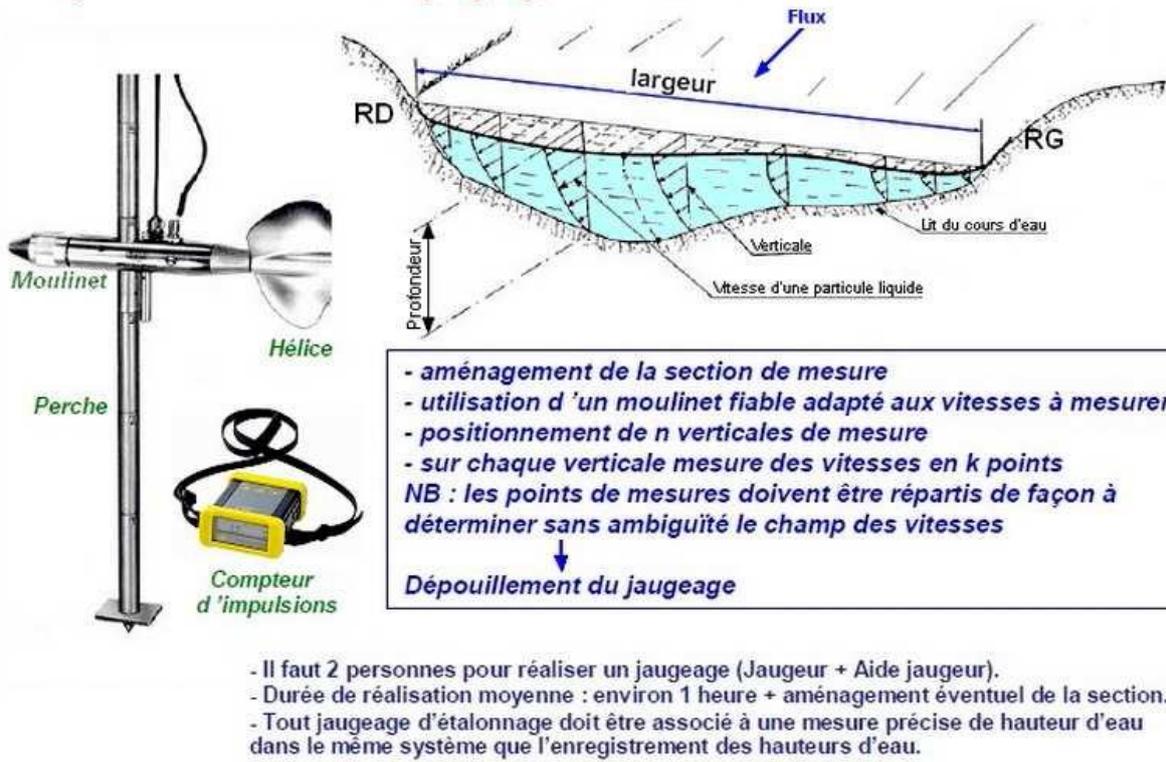


Fig. Matérialisation de la section de mesure

Principe de la réalisation d'un jaugeage au moulinet



Mesure à l'aide de flotteurs ou jaugeage au flotteur

Le jaugeage au flotteur est recommandé dans les cas suivants :

- L'utilisation d'un moulinet est **difficile** ou **impossible** à cause des **vitesses trop élevées** ou **trop basse**, des **profondeurs** excessives ou encore la présence de **matériaux** en **suspension**.
- Evaluer **rapidement** le débit d'un cours d'eau.

La **vitesse** de l'écoulement est **déterminée** en mesurant la **vitesse** de **déplacement** de flotteurs **largués** dans le cours d'eau. On peut utiliser des **flotteurs naturels** ou **artificiels** : bouchons de pêche, morceaux de bois, bouteilles, balles de ping-pong, etc. Il s'agit, alors, de **mesurer uniquement** des **vitesses** de **surface**, ou plus exactement les vitesses dans la tranche superficielle de l'écoulement (les 20 premiers centimètres environ). En général, la vitesse moyenne dans la section est de l'ordre de 0,4 à 0,9 fois la vitesse de surface. Le débit sera calculé par :

$$Q = k \cdot V_{\text{moy}} \cdot S \quad \text{avec :}$$

k : coefficient de débit de l'ordre de 0,4 à 0,9 fois la vitesse de surface (sans dimension) ;

V_{moy} : vitesse moyenne, en m/s, donnée par le temps moyen mis par le ou les flotteurs pour parcourir une distance ;

S : section mouillée en m^2 .

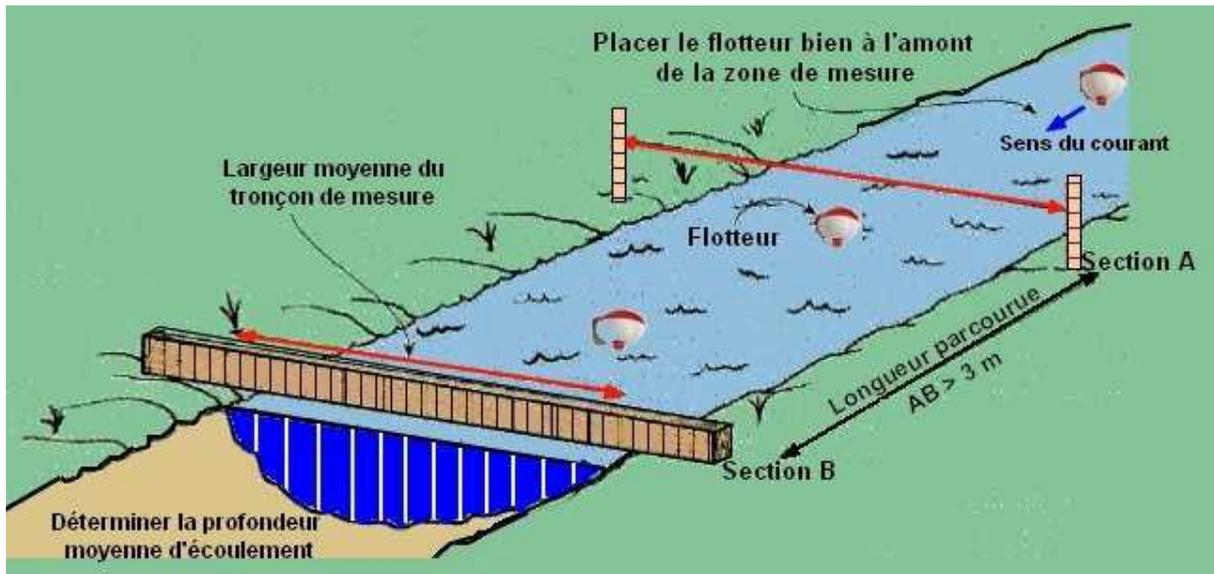


Fig. Schéma de principe du jaugeage au flotteur