

Chapitre V - HYDROMETRIE

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).

V.1- ACQUISITION DES DEBITS 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_t, H_t) permettent d'établir la relation hauteur-débit appelée courbe de tarage : $Q(H)$.
- en combinant la courbe de tarage $Q(H)$ et le limnigraphie $H(t)$, 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.

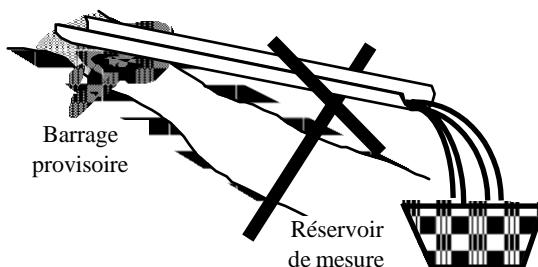
V.2- LES METHODES DE JAUGEAGES

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.

V.2.1- 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 : $Q = V/\Delta t$.

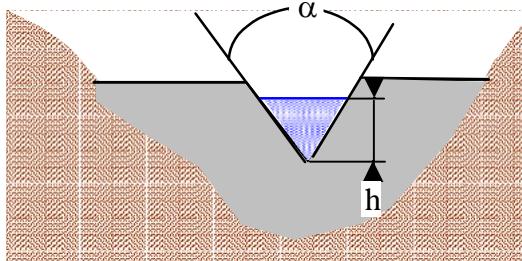
Cette méthode est surtout utilisée pour jauger des sources ou de très petits cours d'eau (débits de l'ordre de quelques litres par seconde au maximum). Le récipient peut être un seau de 10 litres ou un bac plastique de 100 litres par exemple. La seule condition est de pouvoir faire rentrer l'eau dans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



V.2.2 – 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.

Different types of weirs are used but we encounter mainly triangular weirs whose theoretical height-discharge relationship is :



$$Q = a h^b$$

En général on utilise :

$$Q = 1.3 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot h^{2.47}$$

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.



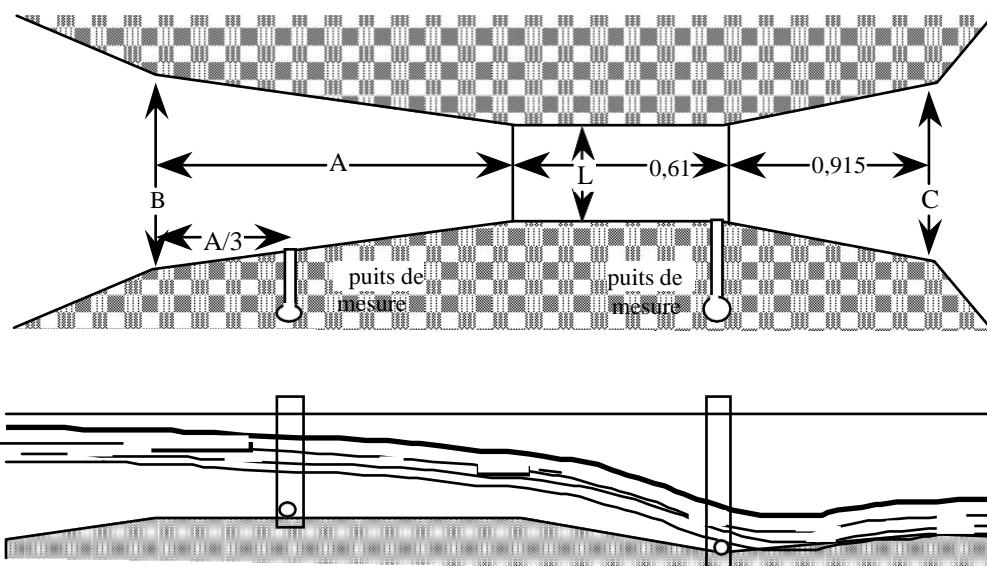
Dans la quasi-totalité des cas, on utilise des déversoirs fixés à demeure dans le cours d'eau. Cette technique n'intéresse donc que des stations où l'on est disposé à réaliser un certain investissement.

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.

V.2.3 - Jaugeurs à ressaut

Ces appareils ont pour but de provoquer un passage en régime critique où la relation hauteur-débit est biunivoque et ne dépend théoriquement que des dimensions géométriques de l'appareil.

Ce passage en régime critique est provoqué soit par un rétrécissement de la veine fluide, soit par un relèvement, soit par les deux à la fois. Les avantages de ces appareils par rapport aux déversoirs sont de ne provoquer qu'un faible relèvement de la courbe de remous et de permettre un passage facile au transport solide.



Le jaugeur à ressaut le plus connu est le jaugeur "Parshall" figuré ci-dessus. Les différentes dimensions sont normalisées en fonction de sa largeur L au col.

$$A = 0.49 L + 1.194$$

$$B = 1.196 L + 0.479$$

$$C = L + 0.305$$

▪ ABC et L en mètres

Le débit Q (en m^3/s) est fonction de la largeur L au col (en m) et de la hauteur d'eau H (en m) : $Q = 0,372 L (H * 3,28)^x$
où

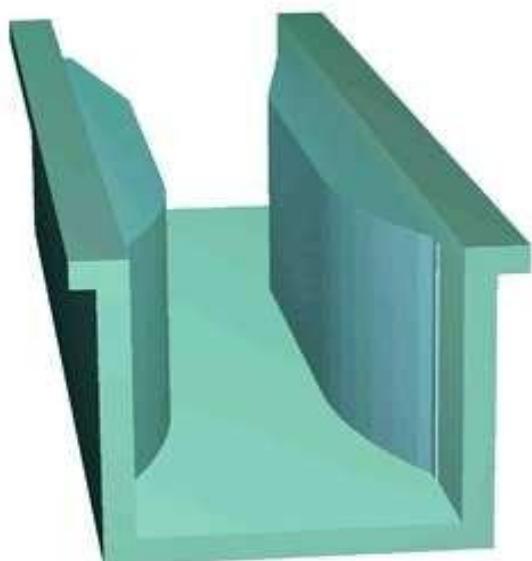
l'exposant x dépend de la largeur au col L :

L (en m)	0,2	0,6	0,8	1,0	1,2
x	1,506	1,548	1,560	1,569	1,575

Il convient cependant de se méfier de ces formules car elles peuvent légèrement varier selon les conditions locales d'installation du Parshall. La prudence élémentaire est de vérifier ces formules par quelques jaugeages.

Enfin, si une remontée du niveau aval noie le ressaut, des coefficients correcteurs peuvent intervenir en fonction du niveau h.

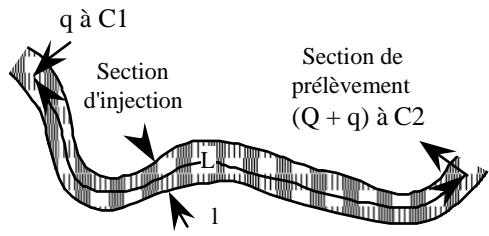
Actuellement les jaugeurs à ressaut sont disponibles sous forme préfabriquée en résine polyester. Il suffit alors de le caler en bonne position dans le cours d'eau puis de le noyer dans du béton en s'en servant comme coffrage perdu.



Exemple de canal venturi



V.2.4 - Jaugeages par dilution



Le principe général du jaugeage par dilution est simple. On injecte dans une section I, un traceur à une concentration C1 ; en un point de prélèvement P situé en aval, on prélève un échantillon d'eau de la rivière et l'on détermine sa concentration C2 en traceur. Il est alors aisément 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.

V.2.4.1 - Choix du traceur

A priori, le nombre de traceurs utilisables est élevé ; cependant, il est souhaitable qu'ils possèdent les qualités suivantes :

- facilement solubles dans l'eau,
- stables chimiquement en solution,
- non toxiques,
- facilement dosables et à faibles concentrations,
- peu coûteux,
- non adsorbable par les matières en suspension ou au contact des rives (argiles),
- non préexistants dans le cours d'eau (si possible) ou à faible concentration,
- etc.

Dans ces conditions, le choix se réduit beaucoup et dans la pratique, on utilise les produits suivants :

- chlorure de sodium (NaCl) : l'inconvénient est que souvent les quantités de sel à injecter sont importantes ; par contre, le dosage par résistivimétrie est relativement aisé ;
- La Rhodamine B (C10 H21 Cl O3 N2) : son avantage essentiel est d'être dosable à de très faibles concentrations. On utilise ainsi peu de produit même pour de gros débits ; on fait donc une économie financière et surtout la mise en œuvre sur le terrain est simplifiée. Cependant, ce colorant rouge très violent est difficile à diluer, à nettoyer des appareils et d'autre part, il se fixe sur les argiles en suspension dans l'eau ;
- le biochromate de sodium (Na2 Cr2 O7) : c'est de loin le traceur qui a été le plus utilisé. Il satisfait à la quasi-totalité des qualités requises pour un traceur hydrologique. Cependant, il s'avère que ce sel est toxique tout au moins à forte concentration ($>>1$ mg/litre) et pour des durées supérieures à la journée ;
- colorants alimentaires : trois traceurs ont été retenus jusqu'à maintenant : la tartrazine (E102), le jaune orange S (E110) et le rouge cochenille (E124). Au niveau des avantages, citons la non-toxicité ; par contre, comme la rhodamine, ces substances sont difficilement solubles ;
- enfin, d'une autre nature, les traceurs radio-actifs :
- à rayonnements γ , surtout le brome 82 ; les inconvénients sont surtout dus à la protection nécessaire (matériel lourd) et à la nécessité d'avoir une pile proche pour les irradiations (période courte de l'ordre de 36 h) ;
- à rayonnements β essentiellement le tritium, beaucoup moins dangereux mais avec une période beaucoup plus longue (24 ans), ce qui justifie son utilisation plutôt comme traceur des eaux souterraines.

On retiendra que le bichromate est un bon traceur jusqu'à présent le plus utilisé. Il est probable que d'autres produits pourront le supplanter comme peut-être les colorants alimentaires ou des traceurs radio-actifs avec le développement des générateurs de radio-éléments ("vaches" à radio-éléments).

Le principe général n'en demeure pas moins le même. Seules les techniques de dosages seront affectées.

V.2.4.2 - Choix du site

La mesure des débits par dilution ne peut s'effectuer que s'il y a un bon brassage de l'eau entre le point d'injection et le point de prélèvement. Il faut que la concentration C2 mesurée au point de prélèvement représente bien la concentration moyenne dans toute la section à cet instant.

Un site favorable est un tronçon de rivière particulièrement agitée avec soit des blocs rocheux au milieu du cours d'eau, soit une succession de coude qui assurent un brassage latéral. Dans la pratique, on a souvent tendance à privilégier le rôle de chutes ou de rapides qui n'assurent cependant qu'un brassage vertical.

La longueur du tronçon sur lequel on doit faire la mesure sera au moins égale à la "distance de bon mélange". Cette notion est un peu subjective ; la meilleure façon de procéder est encore de faire un test avec un colorant et d'évaluer à l'oeil la distance nécessaire pour que ce colorant se répartisse uniformément.

Selon la nature du courant, l'ordre de grandeur des distances de bon mélange est, selon M. ANDRE :

Largeur du cours d'eau (m)	Longueur de bon mélange (m)
0 à 10	50 à 500
10 à 50	500 à 2 500
50 à 200	2 500 à 15 000

On peut également utiliser une formule qui donne la distance de bon mélange L (en m) en fonction de la largeur b (en m) et du débit Q (en m^3/s), ou en tout cas de son estimation, sans cela..... :

$$L = k b^{1,1} Q^{0,33}$$

k est un paramètre qui varie entre 8 et 12 selon la nature du courant.

Par ailleurs, il faut éviter, dans la mesure du possible, que dans le tronçon de mesure, il y ait des zones d'eaux mortes que le traceur met très longtemps à envahir.

V.2.4.3 - Injection à débit constant

Supposons que l'on ait déterminé le site d'injection I, la distance de bon mélange L et par conséquent le point de prélèvement P ; on injecte en I un débit constant q de traceur à la concentration C₁. Au point P, on prélève des échantillons à la concentration C₂.

Si on peut supposer que le régime permanent est atteint, le flux de traceur entrant dans le tronçon est égal au flux sortant :

$$q.C_1 = (Q + q).C_2$$

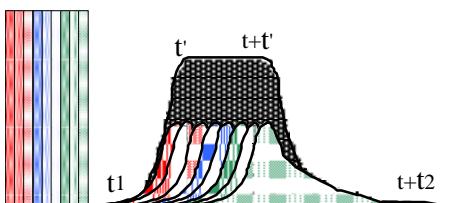
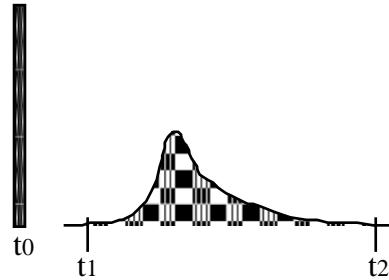
En général, q est négligeable devant Q, d'où l'on tire :

$$Q = q \frac{C_1}{C_2}$$

La seule difficulté est de réaliser le régime permanent. Pour cela, on effectue un essai avec un colorant généralement de la fluorescéine. (Pour une rivière limpide, on peut compter 100 grammes de fluorescéine pour colorer 1 000 m^3 d'eau et on dissout aisément 100 grammes de fluorescéine dans un litre d'eau. On peut se baser sur une dose de 100 g par m^3/s .)

A un instant t = 0, on injecte la fluorescéine au point I et on note au point P l'instant t₁ où apparaît la fluorescéine et t₂ l'instant où elle disparaît.

Cet essai peut s'interpréter comme l'injection en I d'une impulsion de traceur et l'observation P de la réponse impulsionale du tronçon IP. On admet aisément que la durée t₂ - t₁ est indépendante de la qualité de colorant injecté (dans la mesure où l'injection demeure quasi-instantanée).



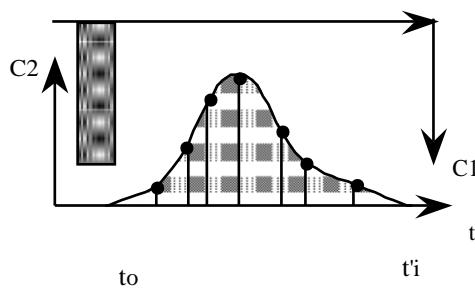
A une succession d'impulsions de durée dt correspondra une succession de réponses impulsionales déphasées dans le temps de dt. La réponse globale de sera la somme des réponses impulsionales comme le suggère la figure ci-contre.

Si on injecte durant une durée t suffisante, on observera une montée de la concentration en sel entre les instants t₁ et t' puis un palier en régime permanent entre les instants t' et t + t' enfin une décroissance entre les instants t + t' et t + t₂.

Dans la pratique, on désire obtenir un régime permanent durant 15 minutes où on fera un prélèvement par minute. Par ailleurs, le temps t₁ est généralement sous-estimé car en fait, t₁ représente l'instant où la fluorescéine disparaît "à la vue" ; on peut raisonnablement penser que la concentration ne s'annule réellement que pour un temps plus long $t_1' \cong t_1 + (t_1 - t_0)$, soit un temps de passage deux fois plus long. Dans ces conditions, on injectera entre les instants t₀ et t_{1'} - t₀ + 15 mn [soit 2 (t₁ - t₀) + 15 mn] et on fera les 15 prélèvements entre les instants t_{1'} [soit 2 (t₁ - t₀)] et t_{1'} + 15 mn [soit 2 (t₁ - t₀ + 15 mn)].

V.2.4.4 - Méthode dite globale

Comme pour le cas précédent, on se positionne en deux points P et I séparés par une distance L de bon mélange. On injecte instantanément en I une certaine quantité de traceurs : un volume V à la concentration C₁ soit V.C₁. Au point P, on fait différents prélèvements dans le temps dont on mesure la concentration C₂(t).



On peut écrire qu'il y a conservation des masses et par conséquent que, ce que l'on a injecté, passera dans la section P, donc :

$$V.C_1 = \int_0^{\infty} Q.C_2(t)dt$$

$$\text{soit } Q = \frac{V.C_1}{\int_0^{\infty} C_2(t)dt}$$

Les différents prélèvements faits en P permettent de construire point par point la courbe C₂(t) et de déterminer alors l'intégrale qui permet d'évaluer Q. Il faut toutefois noter que les "queues de courbe" sont toujours mal connues, dans la mesure où l'opérateur ne dispose pas de l'éternité pour achever ses prélèvements. Il sera dans ce cas toujours judicieux de rechercher si cette "queue de courbe" ne s'ajuste pas à une fonction de type hyperbolique ou exponentielle décroissante, ce qui en facilite l'intégration algébrique.

V.2.4.5 - Mise en œuvre pratique

D'un point de vue pratique, il convient de prévoir les concentrations C₁ à injecter, l'injection à débit constant, les prises d'échantillons.

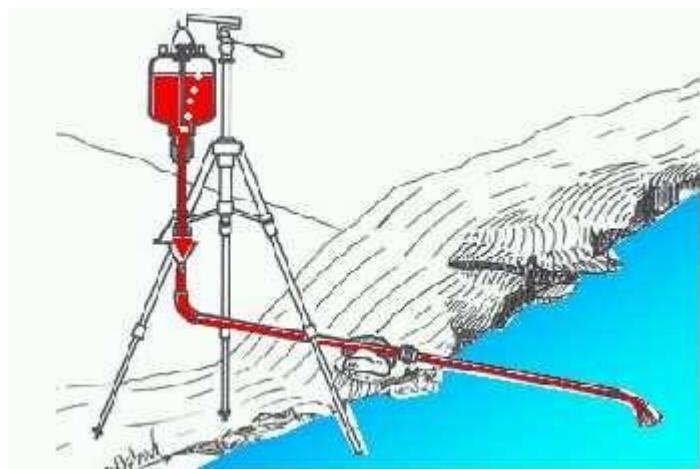
V.2.4.5.1. Concentrations C₁ à injecter :

La quantité du traceur que l'on injectera doit être telle que la concentration finale C₂ soit au moins du double de la précision de dosage. Pour les principaux traceurs, les concentrations minimales dosables C₂ sont les suivantes :

Traceur	Chlorure	Rhodamine	Bichromate	Colorants alimentaires
C ₂ min(mg/l)	5	0,1	0,2	0,2
C ₁ max(mg/l)	200	10	600	100

Il faudra donc en passer par une évaluation du débit à mesurer de façon à ajuster au mieux la concentration et le débit d'injection.

V.2.4.5.2. Injection :



Pour l'injection à débit constant, s'étant fixé le terme $Q C_1$ et la durée t de l'injection, on prépare la quantité de traceur à utiliser (par exemple, dans un fût de 100 ou 200 litres) Le liquide est alors mis dans un récipient fermé hermétiquement. Lorsque l'on ouvre le robinet, il se crée une dépression qui augmente jusqu'à ce que l'air s'introduise par le tube d'aération. Le débit reste alors constant jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le bas du tube d'aération. Ce vase se vidange directement dans le cours d'eau ou si la largeur est importante, on installera une rampe d'arrosage.

Pour la méthode globale, l'injection est plus simple et on se contente de déverser instantanément le contenu du récipient où on a préparé la solution à C_1 .

V.2.4.5.3 .Prélèvements et analyses :

Dans la méthode à débit constant, on prélèvera une quinzaine d'échantillons (un par minute) en passant de la rive droite, au milieu, puis à la rive gauche et retour.

Pour la méthode globale, le plus simple est de procéder à des prises d'échantillons (20 à 25), de volume constant et à des intervalles de temps constants en un point fixe de la section (si possible au milieu).

Le mélange de ces différents prélèvements donnera un échantillon de la concentration moyenne sur la période de prise.

Dans la plupart des cas, l'analyse est faite par colorimétrie ; on procédera donc, durant le jaugeage, à un prélèvement de solution à C_1 que l'on diluera avec l'eau de la rivière à différentes concentrations voisines du C_2 escompté. Au laboratoire, ces échantillons dilués serviront à l'étalonnage du colorimètre.



V.2.4.5.4. -Domaine d'application

Longtemps, les méthodes de jaugeage par dilution n'ont été utilisées que pour des petits débits (inférieurs à 10 m^3/s) et pour des eaux peu chargées.

Le développement de techniques chimiques d'extraction et de reconcentration font que de nos jours, il est possible à des expérimentateurs avertis de procéder à des jaugeages beaucoup plus importants et dans des eaux chargées.

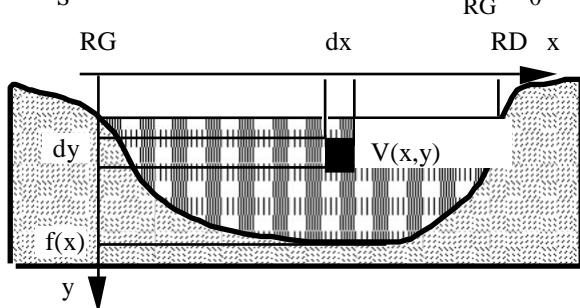
Par ailleurs, ces techniques sont particulièrement adaptées aux cours d'eau très brassés (type torrent de montagne), conditions qui sont au contraire défavorables aux mesures au moulinet comme on le verra plus tard.

Enfin, du point de vue personnel, ces techniques demandent beaucoup de soin, de propreté, etc., surtout la méthode dite globale.

V.2.5 - Jaugeages par exploration du champ des vitesses

Soit une section droite S d'un cours d'eau ; le débit dans cette section se définit comme le flux du vecteur vitesse à travers S ...

$$Q = \int_S V \cdot ds \quad \text{ou plus explicitement} \quad Q = \int_{RG}^{RD} \int_0^{f(x)} V(x,y) \cdot dy \cdot dx$$



Les jaugeages par exploration du champ des vitesses consistent à étudier la fonction $V(x,y)$ en l'échantillonnant suivant différentes valeurs de x et de y . Généralement, on se fixe différentes abscisses (des "verticales") $x_1, x_2, \dots, x_i, x_n$ et sur chaque abscisse x_i , on échantillonne à différentes profondeurs $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ij}, \dots, y_{ip}$, la vitesse $V(x_i, y_{ij})$; cette technique est appelée jaugeage "point par point".

On peut également, sur chaque verticale x_i , mesurer directement ($\int_0^{y_{\max}} V(x,y) \cdot dy$) ; on dit alors que l'on effectue un jaugeage "par intégration".

Regardons maintenant comment s'effectue plus en détails la mesure.

V.2.5.1 - Le matériel de mesures

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

V.2.5.1.1. Les capteurs : les hélices :

Le paramètre à mesurer est la composante normale à la section de la vitesse de l'eau.

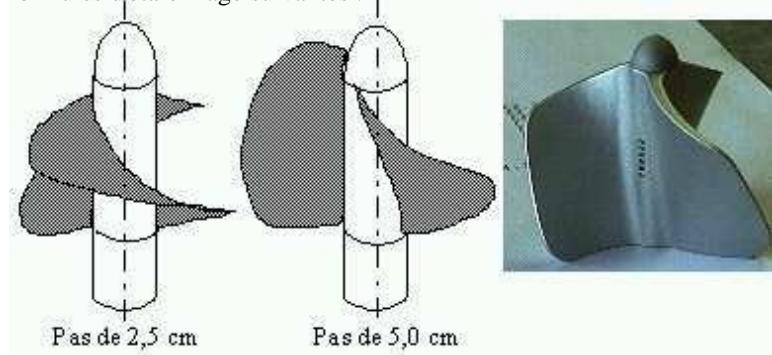
Le capteur le plus utilisé (tout au moins en Europe) est une hélice. Si on introduit cette hélice dans l'écoulement, la vitesse longitudinale de l'eau va provoquer la rotation de l'hélice. Théoriquement, la relation entre la vitesse de rotation n (en tours/seconde) et la vitesse de l'eau V (en m/s) ne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

$$V = n p$$

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 :

$$V = a n + b$$

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 :



$$\begin{aligned} n < 0,59 & \quad V = 0,2345 n + 0,017 \\ n > 0,59 & \quad V = 0,2515 n + 0,007 \end{aligned}$$

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

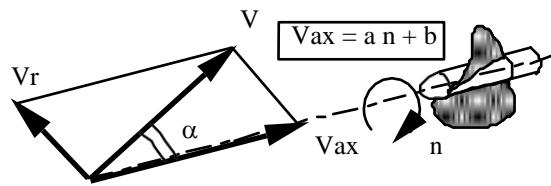
d'enregistrement du nombre de tours par seconde.

Diamètre (m)	Pas nominal(m)	Vitesse minimale (m/s)	Vitesse maximale (m/s)
0,03	0,05	0,050	0,50
	0,10	0,055	1,10
	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
	0,25	0,040	6,00
	0,125	0,050	2,50
	0,50	0,060	5,00
0,1	0,25	0,080	10,00
	1,00	0,080	10,00

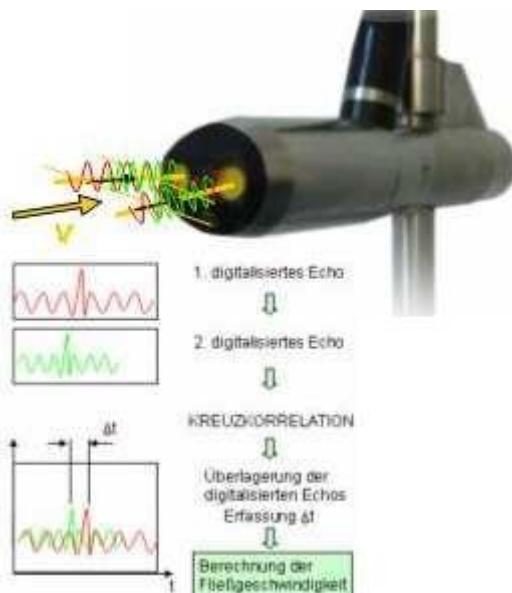
Pour des hélices très classiques (OTT ou NEYRPIC) et des compteurs d'impulsions électriques (limites à n de l'ordre de 10 à 20) on a les domaines d'applications reproduits sur la planche précédente.

L'étalonnage des hélices correspond à la mesure des vitesses de l'eau lorsque l'axe de l'hélice est confondu avec la direction du courant.

Dans certains cas, il n'est pas possible de réaliser cet accord ; aussi a-t-on conçu des hélices dites "auto-composantes". Elles ont pour caractéristiques de mesurer la composante axiale V_{ax} de la vitesse lorsque celle-ci est oblique par rapport à l'axe. Selon les constructions, l'angle α maximum varie entre 15° et 45° .



Les hélices sont réalisées le plus souvent en alliage léger mais apparaissent sur le marché des hélices plastiques tout aussi performantes pour un coût bien moindre. Leur précision est tout à fait satisfaisante puisque l'erreur est toujours inférieure à 1 % (dans la mesure où elles n'ont pas subi de chocs qui les ont détériorées !).



Progressivement on trouve sur le marché, d'autres capteurs que les hélices. On notera par exemple les courantomètres acoustiques numériques.

Les signaux ultrasons émis par les deux transducteurs de l'ADC sont réfléchis par les particules se trouvant dans les cours d'eau (par ex. particules en suspension, plancton, bulles d'air, etc).

Un signal d'écho dépendant de la taille et de la forme des particules est renvoyé aux transducteurs, il est réceptionné puis traité par un processeur numérique DSP.

Ce processus est réitéré après une courte pause. Le deuxième écho réceptionné est également numérisé.

Ensuite, le DSP vérifie à l'aide du procédé mathématique de la corrélation croisée si les deux échos se ressemblent. Le résultat de la fonction mathématique permet de tirer des conclusions sur le décalage temporel des deux échos. Ce décalage est par la suite utilisé pour calculer la vitesse d'écoulement.

V.2.5.1.2. 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.

Les éléments mécaniques sont dans un bain d'huile spécial dont les variations de viscosité avec la température sont négligeables. Des joints empêchent la pénétration des substances en suspension : il n'y a donc qu'une très faible usure des paliers.

L'ensemble du moulinet est généralement réalisé en acier inoxydable. Notons enfin que pour certains matériaux, le dispositif de contact est modifiable de façon à n'émettre une impulsion que les 1, 2, 10 ou 20 tours.

V.2.5.1.3. 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 :

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.

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 Δt ($n = 1/\Delta t$) ; la troisième remet le tout à zéro.

Les compteurs à présélection

Une amélioration a encore été apportée en permettant le choix de la durée Δt 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 Δt en affichant le nombre d'impulsions enregistrées, soit au bout de i impulsions, en affichant le nombre Δt . La deuxième pression remet les compteurs à zéro.

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



V.2.5.1.4. 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 :

Les perches et micro-perches



Le système le plus ancien est constitué d'une perche graduée cylindrique (d'un diamètre ϕ 9 mm à ϕ 30 mm) ou pisciforme (de 20 x 40 mm à 70 x 150 mm) qui est maintenue verticalement dans l'écoulement. Un coulisseau coaxial permet de déplacer le moulinet suivant la verticale. Un tel système ne permet que des jaugeages point par point.

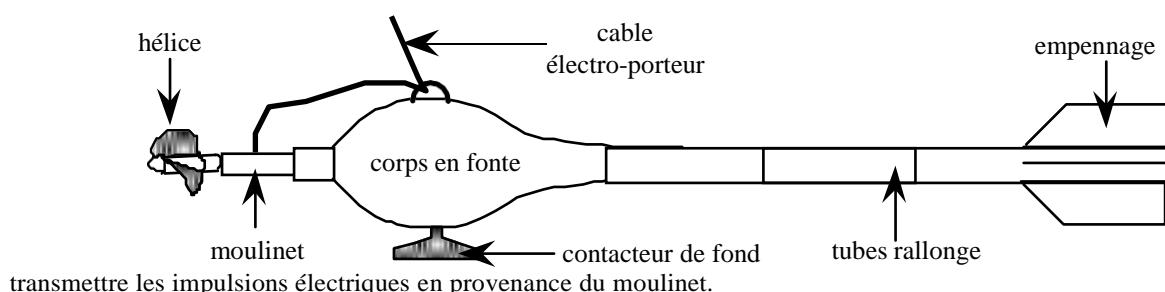
De nouveaux matériaux se sont développés pour permettre des jaugeages à la perche par intégration. Le matériel qui semble le plus au point actuellement est la perche PIREE. La perche support est de section rectangulaire. Sur celle-ci est fixé un boîtier qui contient les différents compteurs (temps, impulsion) et un moteur électrique à vitesse réglable. Sur la perche coulisse un porte-moulinet suspendu au boîtier par un ruban perforé et métallique entraîné par une roue dentée mue par le moteur. La mesure se fait par intégration en remontant le porte-moulinet. Après avoir choisi la vitesse de remontée (de 3 à 40 mm/s), on met en route par un bouton-poussoir. Dès que l'hélice arrive à la surface, on arrête et on lit directement la profondeur, le temps de montée et le nombre d'impulsions. L'énergie est fournie par une batterie rechargeable dont l'autonomie est d'une dizaine de jaugeages.

Ce type d'appareil est certainement celui qui répond le mieux aux besoins des hydrologues pour les jaugeages en bouteilles. La mesure est aisée, plus rapide et plus précise.

V.2.5.1.5. Les saumons

Un saumon est un lest profilé dont le poids varie de 5 à 150 kg. Il porte à sa partie amont le moulinet et son hélice ; un empennage à sa partie permet son orientation dans le sens du courant.

Le saumon est suspendu par un câble électroporteur à un treuil. Le câble sert à la fois à soutenir le saumon, mais aussi à



Le treuil, généralement à manœuvre manuelle, comporte un compteur indiquant la longueur de câble lâchée, ce qui permet de mesurer les profondeurs par rapport à la surface. La descente du saumon peut être manuelle (jaugeage point par point) ou à vitesse constante par adjonction d'un régulateur de vitesse (de l'ordre de 2 à 5 cm/s), ce qui permet de faire des jaugeages par intégration.

Lors de sa descente, on perd généralement de vue le saumon. On lui adjoint un contacteur de fond qui, lorsqu'il touche le fond, forme un circuit électrique et allume à la surface une ampoule ou un signal sonore.

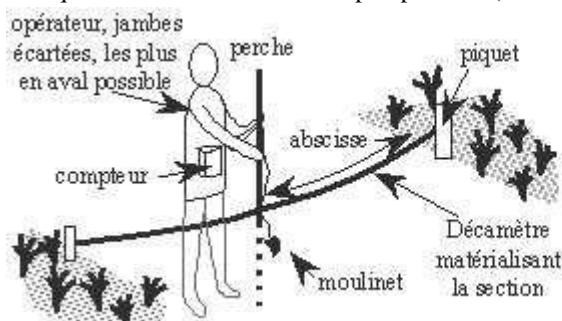
V.2.5.2. - Matérialisation de la section et déplacement transversal

Nous venons de voir comment les supports permettent de déplacer le moulinet le long d'une verticale ;

nous allons voir maintenant comment déterminer la section transversale et comment s'y déplacer d'une verticale à une autre. Différentes techniques complémentaires et adoptées au cours d'eau sont utilisables :

V.2.5.2.1. Jaugeages "en bottes"

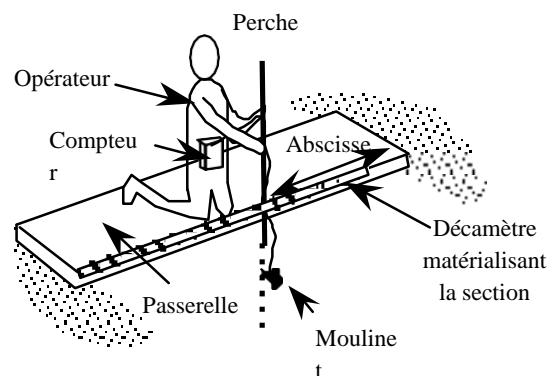
Dans ce cas, l'opérateur rentre dans le cours d'eau avec la perche moulinet et le compteur. On conçoit aisément que cette technique se limite au cours d'eau peu profond ($h < 1 \text{ m}$) et surtout à faible courant ($V < 2 \text{ m/s}$).



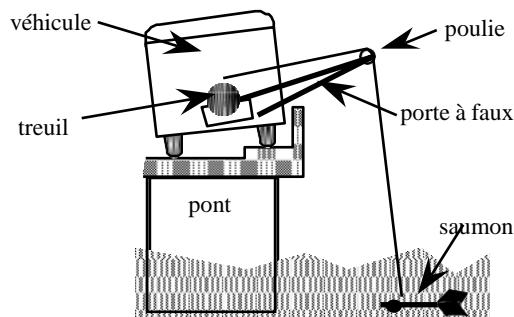
La section est matérialisée par un double décamètre tendu perpendiculairement à l'écoulement général. L'opérateur place la perche verticalement à la hauteur du décamètre, ce qui permet de repérer l'abscisse de la verticale. Dans la mesure du possible, il se tient le plus en aval et jambes écartées de façon à ne pas perturber l'écoulement au niveau du moulinet. La perche est tenue de manière que le moulinet soit bien dans le sens du courant. Le jaugeage est alors effectué point par point ou par intégration.

V.2.5.2.2. Jaugeages depuis une passerelle :

Quand on dispose d'une passerelle, on peut procéder d'une façon analogue à la précédente. La section est matérialisée par la passerelle sur laquelle on se déplace en abscisse. Les avantages sont que d'une part, l'opérateur n'est pas soumis au froid et d'autre part, que l'on peut jauger sur des profondeurs plus grandes (jusqu'à 3 m) et à de plus fortes vitesses (jusqu'à 3 m/s). Dans ce dernier cas, on fixe la perche sur un pied de manœuvre solidaire de la passerelle.



V.2.6. Jaugeages au saumon depuis un pont :



Lorsque la vitesse devient trop forte ou la profondeur trop grande, il est nécessaire d'utiliser un saumon. Celui-ci est suspendu à un treuil simple par l'intermédiaire d'une porte à faux fixée sur un véhicule lorsque la taille du pont le permet ou sinon, à une cyclopotence moins encombrante. Comme précédemment, le pont matérialise la section et les profondeurs se lisent sur le treuil.

V.2.5.2.4. Jaugeages avec traînes téléphérique



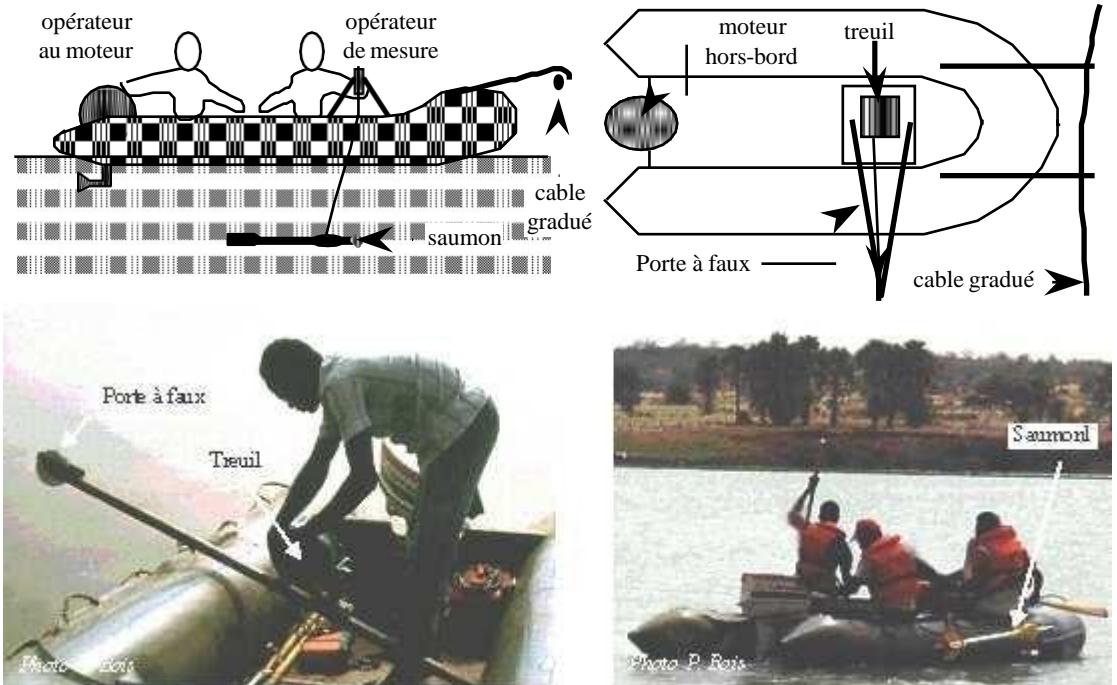
Lorsqu'il n'y a pas de pont et que le cours d'eau ne se prête pas à la navigation, on peut utiliser une station dite téléphérique. Le saumon est alors suspendu par son câble électroporteur à un chariot se déplaçant le long d'un câble porteur. Différents matériels existent selon les poids des saumons (de 25 kg à 100 kg) et les portées (de 50 m à plus de 400 m). Le treuil est alors double avec un compteur des déplacements horizontaux et un pour les déplacements verticaux.

De telles stations permettent de faire des jaugeages par temps de crue en laissant le personnel à l'abri des dangers ; par contre, l'investissement est lourd car il faut le plus souvent laisser le matériel à demeure. Même avec des treuils motorisés, la manœuvre est longue. Signalons enfin que dans le cas de courants très violents, le saumon est entraîné vers l'aval ; ainsi, la section explorée n'est plus verticale.

On peut y remédier en installant un deuxième câble à l'amont duquel est également suspendu le saumon, ce qui permet de le ramener dans la section verticale.

V.2.5.2.5. Jaugeages en bateau :

Il est possible d'équiper un bateau plus ou moins léger pour effectuer les jaugeages. Cela se justifie pour les rivières de grande largeur (difficultés à installer un téléphérique) ou lorsque le bateau est lui-même un moyen d'approche du site de jaugeage. Le plus fréquemment, ce sont des bateaux légers pneumatiques que l'on équipe d'une porte à faux avec un treuil simple et un saumon.



Dans la mesure du possible, la section est matérialisée par un câble tendu au travers du cours d'eau. Ce câble est gradué de façon à permettre le repérage en abscisse. L'un des opérateurs se maintient au moteur de façon que le bateau reste au niveau du câble (système d'accrochage) sans tirer sur lui. Le moteur doit rester en marche et compenser le courant de façon à pouvoir manœuvrer immédiatement en cas de dangers (coups flottants). Si la rivière est trop large pour que l'on puisse tendre un câble en travers, on disposera des repères sur les rives de façon à se positionner dans la section par relèvement avec un cercle hydrographique.

Ce type de jaugeage est limité par la vitesse de courant qui ne doit guère dépasser 2 m/s. Un inconvénient est que le bateau perturbe les vitesses en surface.

V.2.5.3. - Conduite et exploitation du jaugeage

V.2.5.3.1. Choix du site

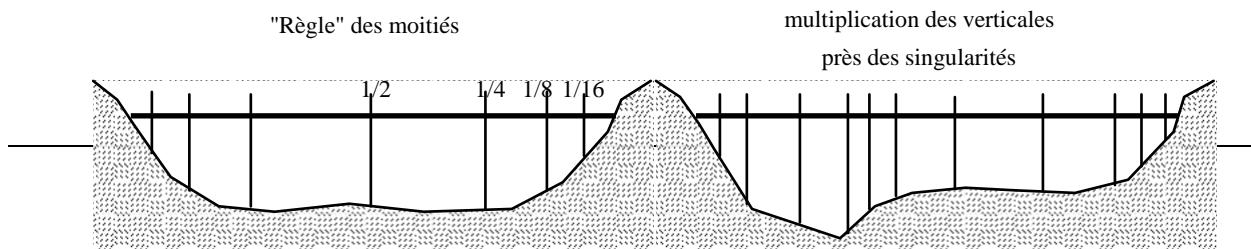
Généralement, le site du jaugeage n'est pas complètement imposé ; on peut très bien selon les cas, envisager différents sites plus ou moins en amont ou en aval, dans la mesure où il n'y a pas d'affluent ou de pertes entre ces points.

On choisira donc de préférence un site où les vitesses sont parallèles entre elles et perpendiculaires à la section de jaugeage. La profondeur doit être suffisante par rapport au diamètre de l'hélice (au moins 10 cm environ), mais les vitesses doivent être également suffisantes par rapport aux vitesses de démarrage des hélices (au moins 5 cm/s).

Enfin, le fond doit être si possible régulier et dépourvu d'entraves au fonctionnement de l'hélice (végétation par exemple). Pour les jaugeages au saumon depuis un pont, on choisira de préférence des ponts n'ayant pas ou peu de piles en rivière car cela provoque des remous dans lesquels il est difficile de mesurer le débit. Généralement, la mesure se fait en aval du point avec un saumon et en amont avec une perche, mais l'inverse est possible selon les cas.

V.2.5.3.2. Choix des verticales :

Le nombre de verticales doit être suffisant pour bien définir la section mouillée et la répartition des vitesses. Ce nombre est variable et il est bien difficile de fixer une règle stricte. Disons que généralement 5 à 20 verticales sont suffisantes mais le choix est une question d'appréciation sur le terrain. On multipliera les verticales par des hétérogénéités de la section.

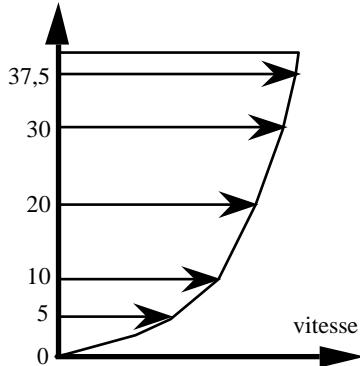


Dans les cas simples, on pourra appliquer la "règle" dite des moitiés avec une verticale au milieu, deux aux quarts, deux aux huitièmes, deux aux seizeièmes de la section.

V.2.5.3.3. Durée et nombre de mesures sur une verticale :

Dans le cas d'un jaugeage point par point, le nombre de mesures par verticale dépend de la profondeur totale et de la variabilité des vitesses.

distance du fond



Ce nombre de points varie généralement de 5 à 10, les points étant souvent resserrés vers le bas. Prenons le cas d'une verticale de 40 cm de profondeur jaugée avec une micropêche et une hélice de ø 5 cm ; on fera la première mesure à 5 cm du fond (2,5 cm en plus du rayon de l'hélice) puis les autres à 10, 20, 30 et 37,5 cm du fond (l'hélice tangentant la surface libre).

A chaque point de mesures, il faut laisser tourner l'hélice un temps suffisant pour obtenir la vitesse moyenne en ce point et que l'erreur sur les temps soit négligeable. En général, on admet des mesures d'au moins 30 secondes et d'au moins 100 impulsions.

Dans le cas d'un jaugeage par intégration, le principe est d'explorer la verticale, de profondeur h , à vitesse constante v (variant de 1 à 5 cm/s dans les cas les plus fréquents).

Supposons que la verticale soit à l'abscisse x ; on peut définir la vitesse moyenne \bar{V}_x dans cette verticale comme étant...

$$\bar{V}_x = \frac{1}{h} \int_0^h V(x, y) dy$$

mais l'on a : $v = dy/dt$

et $V(x, y) = a n + b$

$$\bar{V}_x = \frac{1}{h} \int_0^t (an + b) V dt$$

$$= \frac{1}{h} av \int_0^t n dt + \frac{i}{hb} \int_0^t v dt$$

Mais $\int_0^t v dt$ représente le nombre n d'impulsions enregistrées durant la montée

$\int_0^t v dt$ est la profondeur h de la verticale

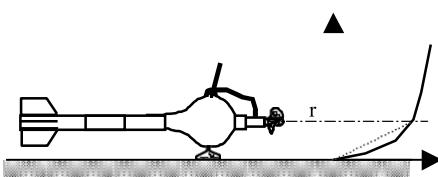
$$v/h = 1/t \quad (t : \text{durée de la montée}) \quad \bar{V}_x = a n/t + b$$

Dans la mesure où les paramètres a et b sont constants (tarage purement linéaire), la vitesse moyenne sur une verticale se déduit de la vitesse moyenne de rotation durant la remontée.

Dans ces conditions, les règles de durée de la mesure seront les mêmes que pour les jaugeages point par point : la vitesse de montée (ou descente) v doit être telle que l'on ait environ $t > 30$ secondes et $n' > 100$ impulsions

Remarquons que vers la surface, on arrête le comptage lorsque l'hélice traverse la surface libre ; par

contre au fond, le comptage s'arrête à une distance r du fond. Comment tenir compte de ce fait ? On peut raisonnablement penser que le profil des vitesses est sensiblement triangulaire sur les r premiers centimètres. La vitesse moyenne y est $(V_x, r/2) = V(x, r)/2$.



On procédera donc de la façon suivante : on mesure sur la zone (r, h) , le nombre n' d'impulsions pour un temps t ; ensuite, on procède à la "mesure résiduelle de fond" en laissant l'hélice tourner à la profondeur r durant la moitié du temps qui aurait été nécessaire pour atteindre le fond ; on compte n'' impulsions durant un temps $r/2v$; on calcule ensuite la vitesse moyenne sur la verticale par la relation :

$$V_x = a \frac{\frac{n' + n''}{r}}{t + v} + b = a \frac{\frac{n' + n''}{h}}{v} + b$$

V.2.5.3.4. Exploitation du jaugeage

L'exploitation du jaugeage ne peut se faire correctement que si la tenue du carnet de terrain a fait l'objet d'un soin particulier. Tous les éléments qui peuvent expliquer les anomalies constatées au bureau sont notées. Il vaut toujours mieux être trop précis dans la description du jaugeage.

Cours d'eau, lieu, jour, heures, minutes de début et de fin de jaugeage, hauteurs à l'échelle de début et de fin (si on dispose d'une échelle), noms des opérateurs et matériels utilisés (numéro de l'hélice, du moulinet, support).

Pour chaque verticale, on notera l'abscisse, la profondeur totale et soit les différentes couples hauteur-vitesse (jaugeages point par point), soit la vitesse moyenne, l'angle α du câble du saumon par rapport à la verticale et l'angle β du saumon par rapport à la normale à l'écoulement (jaugeage au saumon).

distance du fond

On interprétera le jaugeage en considérant successivement chaque verticale et on porte dans un graphique les couples hauteur-vitesse. (Après avoir corrigé éventuellement la hauteur h de l'angle α et la vitesse de l'angle β .)

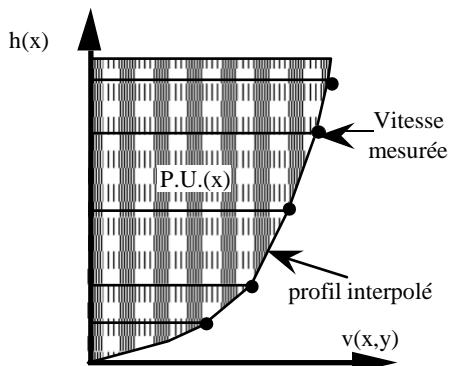
On interpole à partir de ces points, le profil des vitesses le plus vraisemblable.

On intègre ensuite ce profil dont l'aire inférieure appelée

P.U. (profil unitaire) est :

$$P.U.(x) = \int_0^{h(x)} v(x, y) dy \text{ (en } m^2 /s)$$

directement le P.U. (x)
à partir de la vitesse
moyenne sur la verticale $V(x)$ et de
la profondeur $h(x)$: $P.U.(x) = h(x) V(x)$



Si on a procédé à un jaugeage par intégration, on calcule

Ayant déterminé les différents P.U. (x), on les reporte directement en fonction de l'abscisse x des verticales. On interpole le profil en travers des P.U. en s'appuyant sur les différentes verticales exploitées et les rives gauches et droites.

L'intégrale de ce profil en travers n'est autre que le débit puisque :

$$\int_{RG}^{RD} P.U.(x) dx = \int_{RG}^{RD} \int_0^{h(x)} v(x,y) dx dy = Q$$

Notons que ces deux intégrations graphiques successives sont faites impérativement au moins une fois sur le terrain car il est hors de question de quitter un site sans avoir exploiter le jaugeage (en cas d'erreur, on peut recommencer le jaugeage). L'intégration se fait en comptant les centimètres-carré sur un papier millimétré ou en utilisant une calculatrice (intégration discrète par les trapèzes). Au retour au bureau, on vérifiera la première exploitation (si possible par un autre opérateur) en utilisant un planimètre ou une table à digitaliser.

V.2.5.3.5. Jaugeages par "verticales indépendantes"

La plupart des jaugeages sont faits pour établir une courbe de tarage, c'est-à-dire associer à un débit Q une hauteur H. Lorsque le débit varie rapidement durant le jaugeage, on est confronté à un dilemme :

- soit faire un jaugeage précis mais plus long, donc avec une incertitude sur H,
- soit faire un jaugeage rapide mais moins précis.

Le choix du nombre de verticales et de points de mesures par verticale est un compromis entre ces deux possibilités.

Si vraiment le débit varie trop vite, on pourra procéder par "verticales indépendantes".

Ayant choisi un certain nombre de verticales, on les exploite d'une rive à l'autre en notant la hauteur à l'échelle pour chaque verticale. On recommence plusieurs fois les mesures sur chaque verticale et donc pour différentes hauteurs.

Les résultats obtenus sur chaque verticale d'abscisses x_i pour différentes hauteurs H_j sont interprétées pour obtenir comme précédemment les P.U. (x_i, H_j). Pour chaque verticale, on établit le profil des P.U. (x_i) avec la hauteur H à l'échelle. Ensuite, pour différentes hauteurs H , on interpole les P.U. correspondantes sur les différentes verticales.

V.2.6. - Système mobile de mesure de débit à effet Doppler

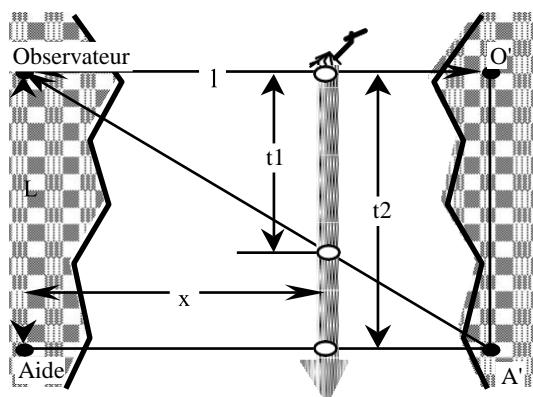
Système de mesure de débit mobile à effet Doppler pour la mesure dans les rivières et les canaux (depuis un pont, un bateau

ou un téléphérique) permet de mesurer des profils de vitesse verticaux, ainsi que des profondeurs, sur un nombre paramétrable de verticales sur la rivière. Par le biais d'une liaison Bluetooth, le Qliner transmet les données directement au Pocket PC. Les avantages sont nombreux :

- Permet aux jaugeurs de rester hors des cours d'eau
- Technologie Doppler mobile pour des mesures précises, idéal pour les rivières de taille moyenne et parfaitement adapté aux mesures dans le cas d'inondations
- Adapté aux sections étroites avec rives pentues
- Utilisable à partir d'un treuil monté sur potence ou d'un téléphérique
- Pas de GPS, ni de "bottom tracking" nécessaire : utilisation sans réserve en cas de fond en mouvement
- Idéal pour les rivières moyennes - largeur de 1 à 30 m et profondeur de 0.3 à 5 m -, mais possibilité d'utilisation en rivières de taille supérieure également
- Système complètement intégré



V.2.7. Jaugeage au flotteur



Comme nous venons de le voir, les différentes méthodes permettent dans la majorité des cas d'estimer le débit d'un cours d'eau.

Cependant, dans des cas exceptionnels (crues catastrophiques, matériel hors service ou inadapté, etc.), il n'est pas possible d'utiliser les méthodes décrites précédemment. On pourra en désespoir de cause procéder à un jaugeage "*au flotteur*", ce qui est toujours préférable que de ne rien faire. Pour cela, il est nécessaire d'avoir un chronomètre à aiguilles rattrapantes et un aide. On choisit deux sections transversales limitées par des repères sur les rives OO' et AA' ; puis on choisit des corps flottants entraînés par le flot (flotteurs) et on mesure le temps t_1 mis pour aller de la section OO' à l'alignement OA' .

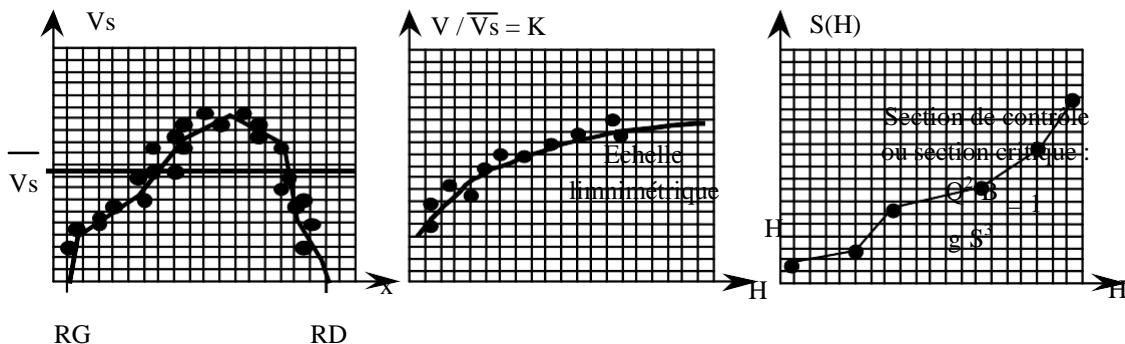
Puis on mesure le temps t_2 mis pour aller de la section OO' à la section AA' (l'aide signale à l'observateur le passage du flotteur dans AA'). Ce travail est effectué pour de nombreux flotteurs passant dans toute la section.

Après la crue (ou avant si on a disposé les repères fixes $OO' AA'$), on mesure la distance $OO' = 1$ et $O'A' = L$ pour chaque flotteur. Les temps t_1 et t_2 permettent de déterminer leur vitesse V et leur abscisse x :

$$V = \frac{L}{t_2} \quad x = \frac{t_1}{t_2}$$

On reporte sur papier millimétré les différents couples (V, x) correspondant à chaque flotteur. Ces points permettent de tracer un profil en travers les vitesses de surface à partir duquel on détermine la vitesse moyenne de surface .

Pour les jaugeages antérieurs effectués par exploration du champ des vitesses, on peut calculer la vitesse moyenne $V = Q/S$ et sa vitesse moyenne de surface \bar{V}_S . On porte le rapport V/\bar{V}_S en fonction de la hauteur à l'échelle ; généralement, ce rapport tend lentement vers 1 ($0,8 < V/\bar{V}_S < 1,05$). Sur ce graphique, on peut extrapoler la valeur du rapport V/\bar{V}_S par la hauteur H à laquelle on a effectué le jaugeage au flotteur.

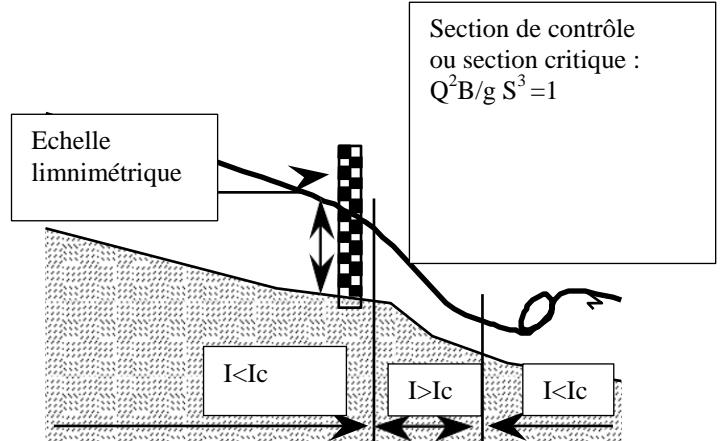


Connaissant \bar{V}_S , on en déduit V mais les profils topographiques faits dans la section donnent la relation entre la surface mouillée S et la hauteur à l'échelle H . Il suffit alors de multiplier la surface mouillée par la vitesse moyenne pour avoir

une estimation du débit Q : $Q \approx k S(h) V_s$

V.3. - LES STATIONS DE JAUGEAGE

Une station de jaugeage est un site (ou éventuellement plusieurs mais proches) où on réalisera les différentes opérations nécessaires à l'acquisition des débits en fonction du temps. En particulier, ce site doit de préférence être tel que la relation hauteur-débit soit biunivoque et stable dans le temps.



V.3.1. - Le seuil ou contrôle

Le cas idéal est donc celui d'un site où la courbe de tarage est biunivoque : on choisira donc un emplacement situé juste à l'amont d'une traversée du niveau critique, ainsi les perturbations de niveau aval ne se feront pas sentir.

H ne dépend que du débit, de la forme de la section critique et des pertes de charge entre station critique et station de mesures (qui sont sensiblement constantes). Pour que la courbe de tarage soit stable dans

le temps, il faut donc essentiellement que la forme de la section de contrôle soit stable dans le temps.

Enfin, il est souhaitable que la section soit sensible, c'est-à-dire qu'une erreur Δt (en général de l'ordre du cm) n'entraîne pas une erreur inacceptable sur le débit. Cette sensibilité est souvent faible en basses eaux.

Dans la mesure du possible, on cherchera des seuils naturels ou installés depuis longtemps ; on est à peu près assuré dans ces cas, d'avoir un seuil stable. Les contrôles de ce type sont tous ceux qui conditionnent un passage en régime critique : chutes, rapides, rétrécissements du lit, passage de ponts, etc.



Exemples de seuil artificiel et d'un contrôle naturel par affleurement d'une couche résistante

S'il n'est pas possible de trouver un seuil satisfaisant, on pourra se rabattre sur un tronçon où le régime est uniforme. Là-aussi, une relation biunivoque existe entre hauteur normale et débit :

$$Q = k S R H^{2/3} I^{1/2}$$

On installera donc de préférence la station au milieu d'un tronçon uniforme. Dans ce cas, on voit que le coefficient de Strickler et la forme de la section jouent un rôle ; donc, même avec une section stable, on risque d'avoir une courbe de tarage instable du fait des variations du coefficient de Strickler avec le développement saisonnier de la végétation.

Une autre solution est de construire un seuil artificiel (déversoir, jaugeur, etc.) ; les inconvénients sont d'une part le coût d'une telle installation si on veut qu'elle ne soit pas emportée par la première crue ; d'autre part, une modification du lit entraîne une variation des conditions de transport solide et cette station n'est pas stable immédiatement (sédimentation et affouillement tendant, on l'espère, vers un équilibre stable).

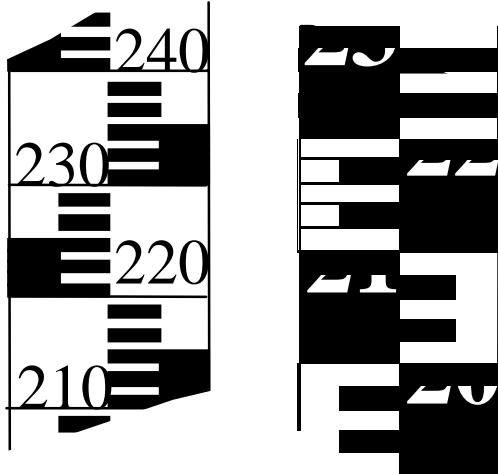
Dans le cas extrême où il n'y a ni tronçon de contrôle ni seuil de contrôle, on installera deux échelles de mesures des niveaux H_1 et H_2 ; la relation entre Q et H_1 H_2 s'obtient en intégrant l'équation différentielle de la ligne d'eau :

$$\frac{dH}{dL} = \frac{i - j}{Q^2 B} \cdot \frac{1 - \frac{g S^3}{g S^3}}{g S^3}$$

V.3.2 - Limnimétrie

La limnimétrie est la mesure des niveaux en fonction du temps. Toute station comporte au moins une échelle de mesures des hauteurs et éventuellement un limnigraphie.

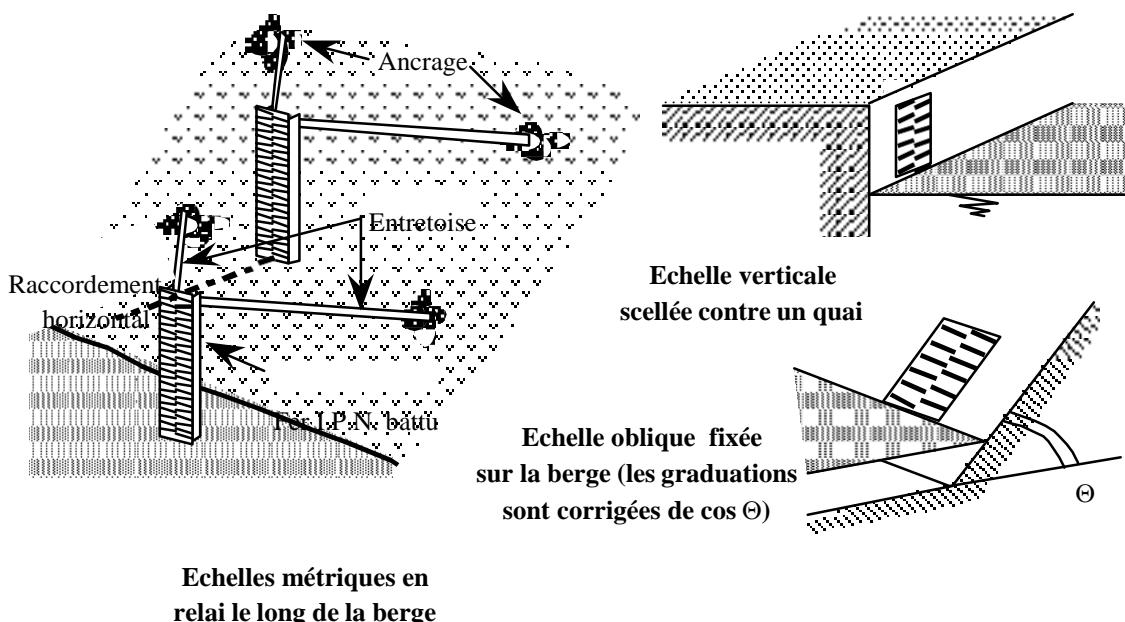
V.3.2.1- Les échelles



Les échelles sont les repères fixes sur lesquels on lira le niveau d'eau H. Elles sont réalisées le plus souvent en tôle émaillée). Constituées généralement d'éléments de 1 m, elles portent des indications métriques, décimétriques et centimétriques. L'installation des échelles se fait sur des supports fixes : fers IPN battus dans le lit, culée de point, quais, rives rocheuses, etc.

L'échelle doit être installée de façon à être protégée des corps flottants qui pourraient l'endommager lors des crues. Par ailleurs, elle doit être à l'abri du battage de façon que l'on puisse lire les niveaux de près.

Une fois installées, les échelles seront nivellées et rattachées au nivellement général. Ainsi, au cas où une échelle serait endommagée, il sera possible d'en remettre une nouvelle à la même cote. Enfin, il faut que le zéro de l'échelle soit toujours sous l'eau, même lors des étiages les plus sévères et après d'éventuels affouillements (des hauteurs négatives entraînent souvent des gênes dans le traitement informatique).

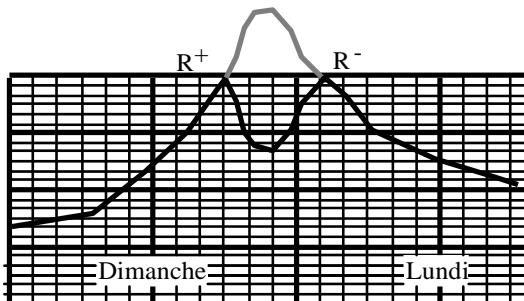
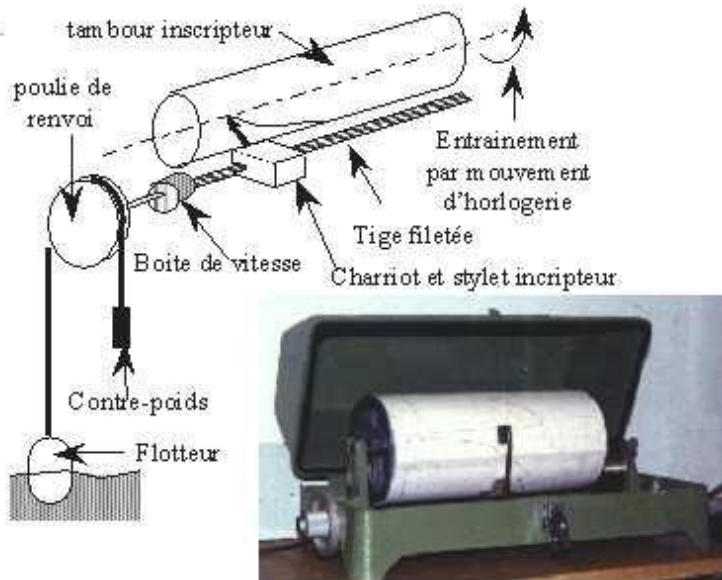


V.3.2.2 - Les limnigraphes à flotteur

Ces appareils ont pour but d'enregistrer les niveaux d'eau en fonction du temps. Parmi tous les types de limnigraphes, ceux à flotteurs sont les plus utilisés.

Leur principe commun est très simple. Le capteur est un flotteur équilibré en partie par un contre-poids dont les déplacements sont liés à ceux du flotteur par un câble et une poulie. Les mouvements verticaux du flotteur sont transformés en mouvements de rotation de l'axe de la poulie. Cet axe entraîne, par un système d'engrenage, le déplacement transversal d'un stylet le long d'une tige filetée.

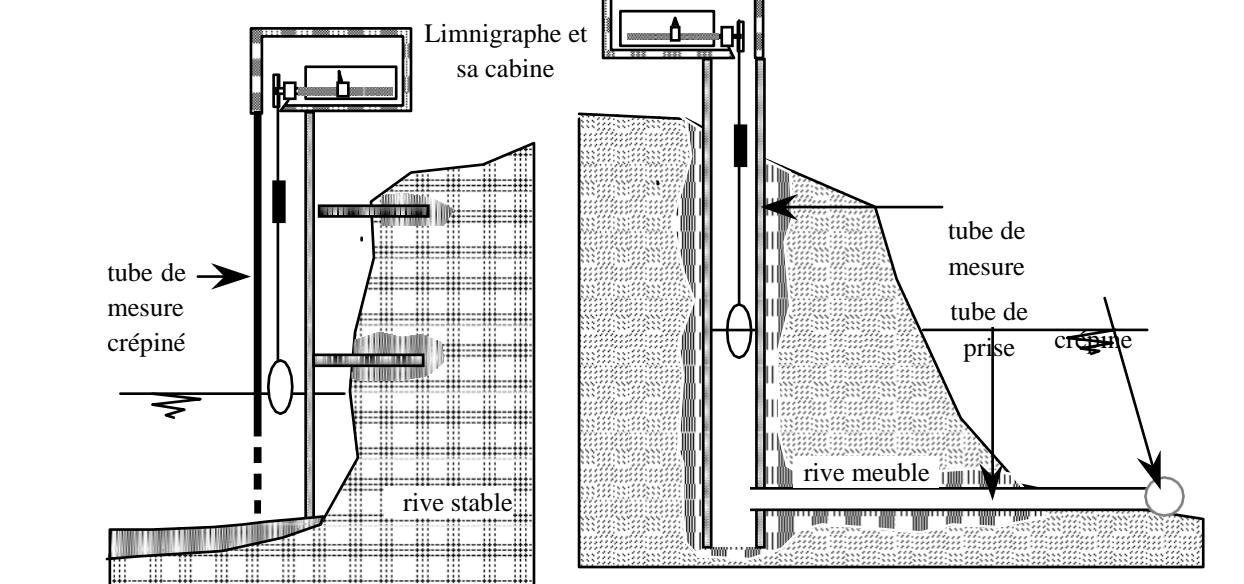
Le stylet inscrit sur le papier d'un tambour ou d'une table déroulante dont le déplacement est proportionnel au temps. Les modèles sont très nombreux : ils se distinguent essentiellement entre les limnigraphes à tambour (à axe horizontal ou vertical) et à table déroulante. En général, le système d'engrenage permet différentes démultipliations : 1/1, 1/2, 1/5, 1/10, 1/20 (1/5 => 1 cm papier = 5 cm niveau).



Par ailleurs, de nombreux limnigraphes sont équipés d'un système dit "à retournements" : la tige filetée possède deux filetages l'un à pas à droite, l'autre à pas à gauche. Le chariot porte-stylet arrivant en bout de course repart en sens inverse ; il n'y a plus de limite à l'amplitude des mouvements du plan d'eau enregistrable.

La figure ci-contre illustre un retournement en crue et un retournement en décrue. L'hydrogramme réel s'obtient par symétrie par rapport aux bords du papier.

Ces appareils sont souvent réglables en vitesse de rotation. Communément pour les tambours, les rotations se font en un jour, une semaine, deux semaines ou un mois ; pour les tables déroulantes, l'autonomie peut être de plusieurs mois. Le mécanisme d'horlogerie peut être entraîné soit par un ressort, soit par des piles électriques. Dans le choix de l'échelle de réduction et de l'autonomie, il faut trouver un compromis entre une bonne sensibilité verticale (réduction faible), mais une amplitude suffisante (forte réduction) pour mesurer toutes les hauteurs et entre une bonne lisibilité des temps (rotation rapide) et une autonomie grande (rotation lente). Dans tous les cas, il est conseillé de ne pas laisser plus d'un mois les appareils sans visite car les sources de panne sont nombreuses.



L'installation de ces appareils se fait à la verticale d'un puits de mesures dans lequel est situé le flotteur. Il est ainsi protégé du batillage et des corps flottants. Selon les cas et les circonstances, l'installation peut se faire soit en prise directe dans le cours d'eau, soit enterrée dans la rive avec un tube de prise.

Les inconvénients de ces appareils résident essentiellement dans :

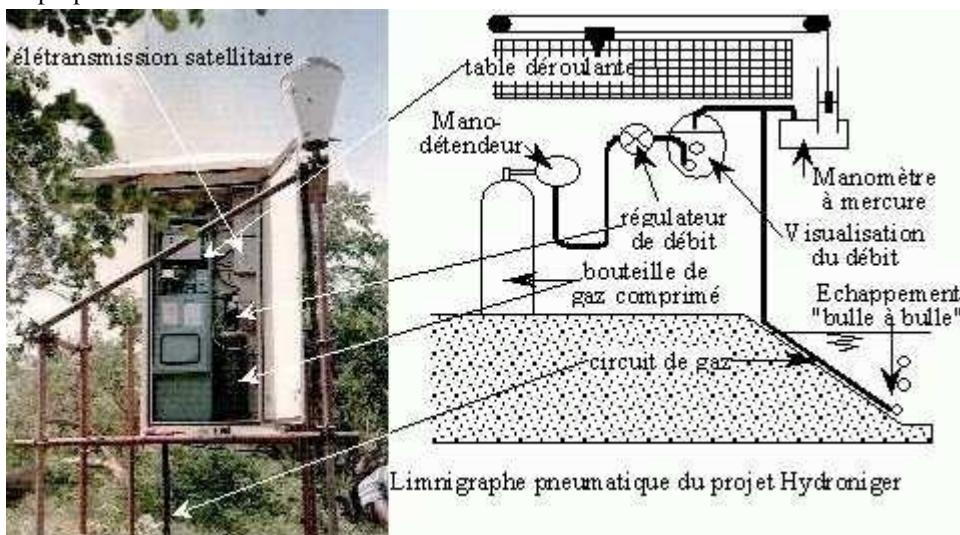
- les possibilités de colmatage des tubes de prise (ce qui provoque un retard entre niveau dans le puits et cours d'eau) ;
- les possibilités de gel dans le tube ;
- le coût de l'installation du puits (puits enterré) ou le risque de mettre l'appareil à portée des crues (puits en prise directe).

Les avantages sont ceux d'un coût relativement modique de l'appareil lui-même, d'un mécanisme simple et robuste.

V.3.2.3 - Les limnigraphes dits à bulles

Ces appareils sont basés sur le principe d'une prise de pression au fond de la rivière. Une bouteille de gaz comprimé (azote ou air), munie d'un manomètre, alimente le circuit gaz à débit constant. Le régulateur de débit est couplé avec un visualisateur ; on peut ainsi régler le débit constant à un écoulement "*"bulle à bulle"*". Le circuit gaz se poursuit jusqu'au fond de la rivière à partir de laquelle s'échappent les bulles de gaz. Sur ce circuit de gaz est branchée une prise de pression reliée à un manomètre à mercure (ou à une capsule manométrique). Le déplacement d'un stylet inscripteur sur une table déroulante est asservi par différents systèmes à la mesure de pression. Or, cette pression est égale à la pression qui règne au fond de la rivière $H \rho g$ moins le poids de la colonne de gaz plus les pertes de charges dans le circuit gaz.

Ces deux derniers termes sont constants (géométrie et débit donnés) et d'ailleurs négligeables. La variation de pression est donc proportionnelle à la variation de niveau.



Les inconvénients de ces appareils résident :

- dans leur coût ;
- dans leur mécanique plus sophistiquée donc nécessité d'un entretien nécessitant un personnel plus qualifié ;
- dans l'astreinte d'une organisation d'un parc de bouteilles de gaz quoi que l'on puisse remplacer la bouteille de gaz par un compresseur électrique programmé pour une mise en route au moment de mesures préprogrammées dans le temps..

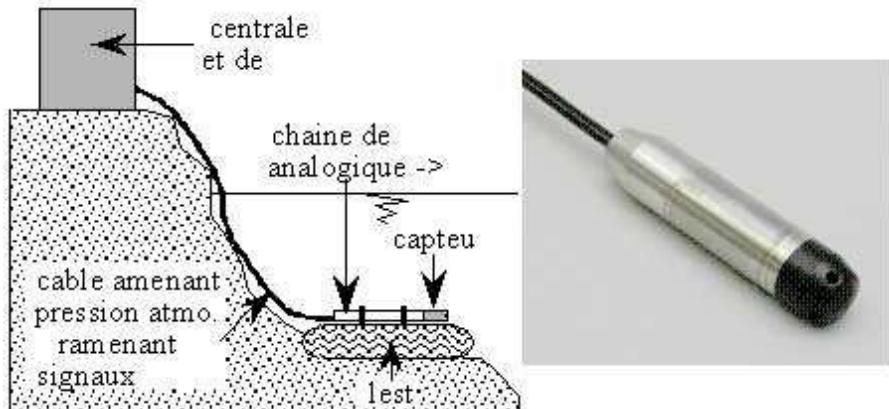
Les avantages sont cependant nombreux :

- l'appareil s'accorde très bien des eaux chargées (si la prise de pression se colmate, la pression du gaz montera jusqu'à déboucher la conduite) ;
- l'appareil peut être installé à plusieurs dizaines voire centaines de mètres du cours d'eau (on peut le mettre hors crue) ;
- si on déplace la station, on récupère facilement tout le matériel (éventuellement, on perdra uniquement le tube du circuit de gaz).

V.3.2.4 - Sondes piézorésistives immergées (S.P.I.)

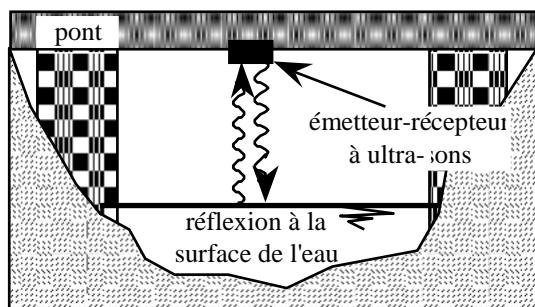
Depuis la fin des années 1980 sont apparues sur le marché de nouveau type de capteurs piézorésistifs. Les déformations que subit le capteur sont dues à la pression (pression atmosphérique + $\rho g H$) et à la température.

Une chaîne de traitement électronique est associée au capteur et délivre sous forme digitale la hauteur d'eau (au cm) et sa température. Le capteur est lui-même dans de l'huile maintenu à la pression de l'eau par une membranette souple.



Ce type d'appareil remplace progressivement les anciens limnigraphes à bulle ou à flotteur.

V.3.2.5 - Limnigraphes à ultra-sons



Ce type d'appareil est constitué d'un émetteur récepteur d'ultrasons, fixé à la verticale du plan d'eau. Le temps de parcours aller retour entre l'appareil et le plan d'eau permet de déterminer la distance x et par déduction la hauteur d'eau H puisque l'on connaît la position nécessairement fixe de l'appareil.

Ce type de limnigraphie nécessite la présence d'un pont stable ou la mise en place d'un portique.



V.3.2.6 - Remarques sur la gestion des limnigraphes

Comme nous l'avons déjà dit, quelle que soit l'autonomie de l'appareillage, il est bon de visiter ces appareils au moins une fois par mois lors du relevé des limnigrammes. Un minimum de mesures de contrôle sont nécessaires : lorsque l'on place le papier d'enregistrement, noter sur la feuille : la date et l'heure de mise en service, et la hauteur d'eau lue à l'échelle, faire de même lors du relevé ; on pourra ainsi contrôler la vitesse de déroulement du papier ainsi qu'un éventuel détarage des hauteurs (glissement du câble sur la poulie, déroulement en biais du papier, horlogerie prenant du retard ou de l'avance, etc.).

Il est bon de prévoir un grand entretien du matériel une fois par an : décolmatage du tube de prise, révision des mécaniques, peinture des cabines de protection.

V.3.3 - Les sections de jaugeage

Lorsque l'on choisit le site d'une station de jaugeage, le critère essentiel est l'existence d'un contrôle stable et sensible ; des critères d'accessibilité s'y ajoutent ; ce n'est qu'en dernier lieu que l'on considère les sections où on

effectue les jaugeages. En effet, il n'est généralement pas nécessaire de faire le jaugeage dans la section même où on effectue la mesure de niveau. Ayant donc choisi le contrôle, on prospectera vers l'amont et vers l'aval (à distance raisonnable bien sûr) les sites possibles pour effectuer les jaugeages. On peut imaginer plusieurs sites selon que l'on est en basses, moyennes ou hautes eaux. Ce dernier cas est certainement celui qu'il faut le mieux prévoir car en période de crues, on ne dispose guère de temps à perdre. Dès l'installation de la station, on retiendra un site pour les jaugeages de crue (pont ou jaugeage en bateaux) et si nécessaire, on installera à demeure un câble pour une station téléphérique. Il faut absolument, pour des crues exceptionnelles, que l'équipe de jaugeage n'ait pas à hésiter sur le site de la mesure et sur la technique à employer. Ce n'est que dans ces conditions que l'on ne ratera pas la crue exceptionnelle.

V.3.4 - Les courbes de tarage

Si on a pu réunir les conditions idéales d'installation d'une station de jaugeage, l'établissement d'une courbe de tarage ne devrait pas poser de difficultés particulières. Malheureusement, ces conditions idéales ne se rencontrent pas fréquemment !

La relation hauteur-débit pour une station avec une section de contrôle dépend à la fois de la hauteur critique H_c pour le débit considéré dans la section de contrôle, mais aussi au niveau normal à l'amont et de la distance à la section de contrôle.

La relation hauteur-débit dépend donc de la forme du lit et du coefficient de Strickler ; il n'est guère possible de préjuger de la forme mathématique que prendra cette relation. On se contente donc de reporter les couples hauteurs-débits obtenus par jaugeage, sur un graphique millimétré ; le nuage de points permet d'évaluer la relation la plus probable.

En général, il est relativement aisé de tracer la courbe de tarage en eau ; par contre, le tarage est plus délicat en hautes et basses eaux.

Lorsque les eaux sont basses, on constate une diminution de la précision relative sur les débits. En effet, de faibles modifications du lit perturbent gravement la relation hauteur-débit. Il en est de même pour le développement de la végétation.

Il est toujours difficile d'obtenir une bonne courbe hauteur-débit en étiage. Les remèdes sont, soit de multiplier les jaugeages d'étiage, soit d'aménager la station pour la mesure des débits de basses eaux. Il est parfois même impossible d'établir une véritable courbe de tarage.

En hautes eaux, le problème essentiel est celui de l'extrapolation de la courbe ; en effet, on enregistre au limnigraphes des hauteurs supérieures à celles correspondant aux jaugeages des plus grands débits. Comment extrapoler cette courbe ? Les solutions sont multiples mais pas toujours satisfaisantes.

Dans les cas les plus simples où la variation de la section est progressive avec la hauteur, on peut supposer que les différents paramètres varient comme des fonctions puissances de $(H - H_0)$, H_0 étant un paramètre dépendant du zéro de l'échelle. Pour extrapoler la courbe de tarage, on portera donc sur un papier log-log, les plus forts jaugeages en testant différentes valeurs de H_0 jusqu'à obtenir l'alignement.

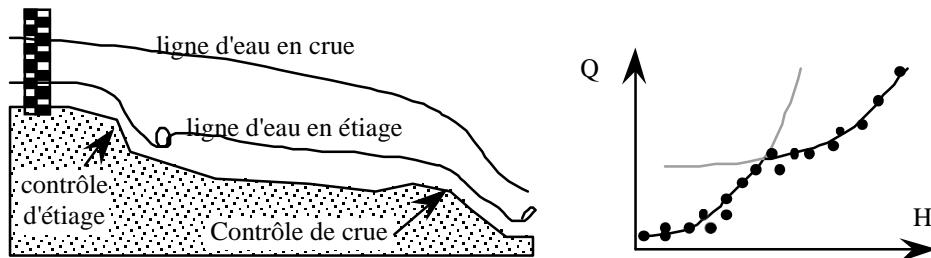
Cependant, la section n'est pas toujours homogène et il est alors préférable d'extrapoler la courbe de tarage d'après par exemple, la formule de Strickler :

$$Q = k S(H) [RH(H)]^{2/3} I^{1/2}$$

$S(H)$ est la section mouillée pour une hauteur H ; $RH(H)$ est le rayon hydraulique. Ces deux fonctions sont

déterminées par l'étude des profils en travers au voisinage de la section de mesures. On se contentera seulement d'extrapoler k (H) et I (H) d'après l'allure de ces courbes obtenues d'après les plus forts jaugeages réalisés. Il faut là-encore se méfier car une station peut très bien avoir plusieurs contrôles.

Comme le suggère la figure ci-dessous, en basses et moyennes eaux, c'est le contrôle A qui gouverne les hauteurs H ; par contre, si le débit augmente, le ressaut en aval de A va se rapprocher puis noyer le contrôle A; la station est alors réglée par le contrôle B.



Dans les premières années de la vie d'une station, on multiplie les jaugeages de façon à établir au plus tôt une courbe de tarage précise.

Dans certaines conditions, on peut avoir une courbe parfaitement stable (pas de végétation, transport solide faible, lit parfaitement stabilisé); il suffit alors de procéder à quelques jaugeages de contrôle assez espacés dans le temps.

Bien souvent, les courbes ne sont pas stables surtout en basses eaux. En effet, l'influence de modifications du lit ou de la végétation perturbe beaucoup la relation hauteur-débit. On est alors obligé de multiplier les jaugeages et

d'établir différentes courbes suivant les périodes de l'année. Généralement, ces courbes sont plus stables en hautes eaux. On obtient donc des faisceaux de courbes de tarage auxquelles sont attachées différentes périodes de validité.

Parfois même, pour les périodes d'étiage, il est impossible d'établir une courbe de tarage. On se contente alors d'interpoler les débits entre les jaugeages successifs en tenant compte d'une façon subjective du limnigramme.

V.4 - ETABLISSEMENT DES HYDROGRAMMES ET DES ANNUAIRES HYDROLOGIQUES

V.4.1 - Digitalisation des courbes de tarage et des limnigrammes

Après le développement de l'informatique, les limnigrammes sont bien sûr archivés mais leur exploitation se fait d'une façon automatique après digitalisation. Les jaugeurs sont indiqués sur les limnigrammes, les points limitant des zones où on peut considérer que H varie linéairement en fonction du temps.

Le limnigramme est alors passé à la table à digitaliser à partir de laquelle on constitue une chronique dite des hauteurs-temps. Cette chronique est celle de base car une fois ce travail fait, il n'y a plus lieu d'y revenir.

Parfois, au lieu d'utiliser un pas de temps variable, on utilise un pas de temps fixe ; cela conduit à un stockage d'informations beaucoup plus volumineux.

Pour les courbes de tarage, on peut procéder à une approximation de cette courbe par un polynôme de degré suffisant, ou - ce qui est généralement préféré - procéder à une digitalisation de la courbe en segment de droite comme pour les limnigrammes.

Evidemment, on archivera également dans le dossier de la station, les résultats de jaugeage qui sont établis une fois pour toute.

V.4.2 - Les annuaires

Chaque année, les principaux services hydrologiques établissent un annuaire où sont récapitulés les débits moyens journaliers de chaque station. Ayant en machine limnigramme et hydrogramme, ce travail ne présente guère de difficultés particulières. Les annuaires précisent également les débits moyens mensuels et annuels aux différentes unités m^3/s , $l/s/km^2$, $mm/mois$, etc. Enfin, on donne les plus forts débits instantanés.

Rappelons qu'un annuaire est susceptible d'être modifié par des améliorations des courbes de tarage, ce n'est donc pas un document définitif. Cependant la sortie de l'annuaire est une étape indispensable au moins moralement, pour la motivation des personnels.

Avant d'utiliser les données d'un annuaire, il est indispensable de consulter le service gestionnaire pour savoir s'il est toujours valide. Avec le développement de l'informatique, il est aisément de recalculer les débits à la demande (périodes autres que

journalières) et de fournir des résultats plus élaborés (graphiques, ajustement) ; c'est l'objet de la banque Hydro en France.

V.4.3 - TENDANCES ACTUELLES

Les tendances qui se dessinent actuellement portent sur une amélioration des techniques existantes ou sur le développement de techniques nouvelles.

V.4.3.1 - Techniques possibles d'enregistrement en continu des débits

Plusieurs techniques ont été envisagées mais elles n'ont pas dépassé actuellement le stade du prototype. Celles qui semblent pouvoir déboucher sur un développement pratique sont :

V.4.3.1.1 - Jaugeages par ultra-sons

Le principe en est relativement simple : deux émetteurs récepteurs sont disposés dans des puits en rives gauche et droite du cours d'eau mais dans des sections décalées. La différence des temps de parcours des ondes ultra-sons entre A et B et B et A dépend de la vitesse moyenne entre A et B.

En faisant ainsi explorer toute la hauteur, on peut espérer atteindre la vitesse moyenne dans la section et dans la mesure où le lit est calibré, le débit.

V.4.3.1.2 - Jaugeages chimiques en continu

Le développement des vaches à radio-éléments de courte période permet d'entrevoir une solution qui consiste à en injecter en continu un traceur radio-actif et à disposer en aval un compteur Geiger dont les indications permettent de remonter aux débits.

V.4.3.1.3 - Jaugeages électro-magnétiques

Le principe est grossièrement le suivant : on crée, au-dessus de la rivière, un champ électro-magnétique (conducteurs bobinés sur des câbles tendus en travers et au-dessus de la rivière ou conducteurs bobinés enterrés sous le lit). L'eau de la rivière étant conductrice, le débit entraîne un déplacement d'un conducteur dans un champ électro-magnétique ; il en résulte une force électro-magnétique induite que l'on mesure avec deux électrodes situées en amont et en aval. Cette force électro-magnétique est liée directement au flux de conducteur donc au débit quelle que soit la forme de la section, la végétation et le transport solide. Actuellement, la limite est le coût de l'installation.