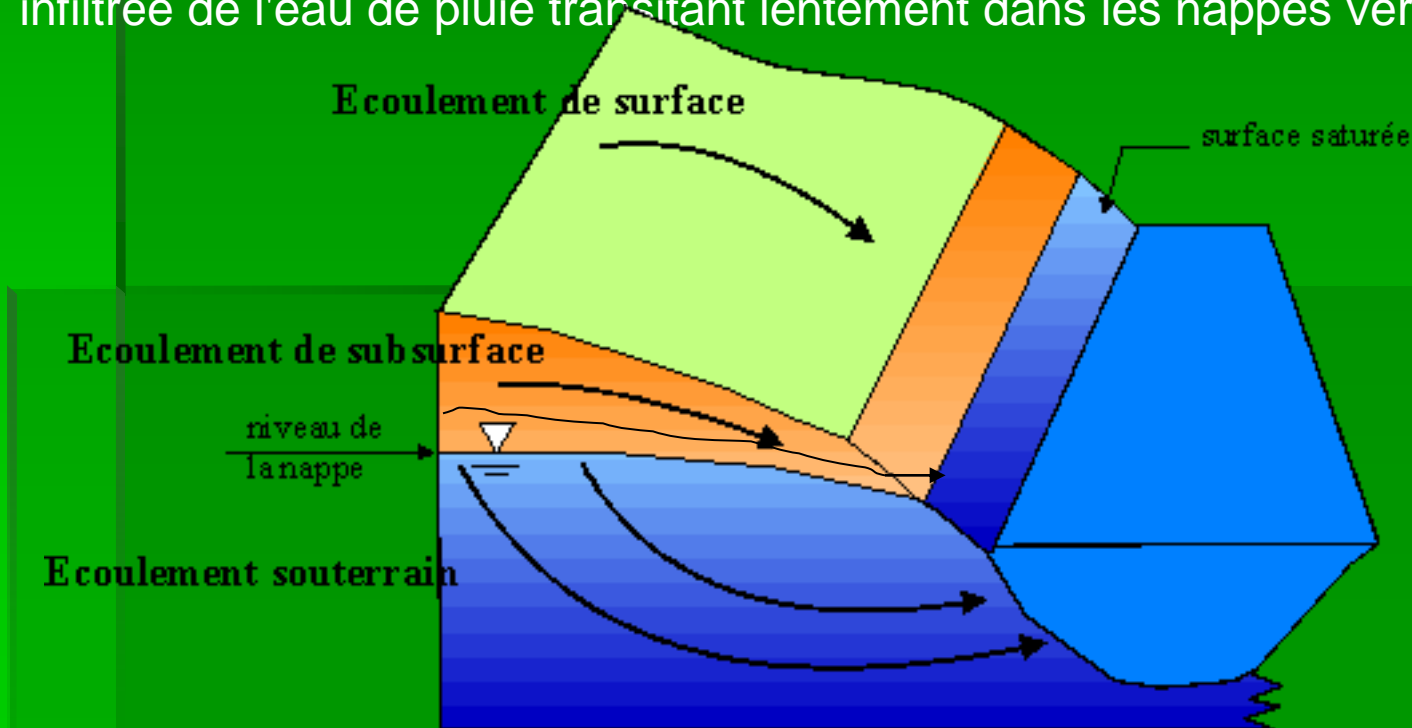


Etude des débits d'un cours d'eau

I- Généralités

On distingue dans un premier temps deux grands types d'écoulements, à savoir :

- les *écoulements* « rapides » qui gagnent rapidement les exutoires pour constituer les crues se subdivisent en *écoulement de surface* et *écoulement de subsurface* :
- les *écoulements souterrains* qualifiés de « lents » qui représentent la part infiltrée de l'eau de pluie transitant lentement dans les nappes vers les exutoires.



1- L'écoulement de surface

Après interception éventuelle par la végétation, il y a partage de la pluie disponible au niveau de la surface du sol :

- en eau qui s'infiltré et qui contribue, par un écoulement plus lent à travers les couches de sol, à la recharge de la nappe et au débit de base,
- et en ruissellement de surface dès que l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol (elle-même variable, entre autre selon l'humidité du sol). Cet *écoulement de surface*, où l'excès d'eau s'écoule par gravité le long des pentes, forme l'essentiel de l'écoulement rapide de crue.

2- *L'écoulement de subsurface*

Une partie des précipitations infiltrée chemine quasi horizontalement dans les couches supérieures du sol pour réapparaître à l'air libre, à la rencontre d'un chenal d'écoulement. Cette eau qui peut contribuer rapidement au gonflement de la crue est désignée sous le terme d'*écoulement de subsurface* (aussi appelé, dans le passé, écoulement hypodermique ou retardé). La présence d'une couche relativement imperméable à faible profondeur favorise ce genre d'écoulement. Les caractéristiques du sol déterminent l'importance de l'écoulement hypodermique qui peut être important. Cet écoulement tend à ralentir le cheminement de l'eau et à allonger la durée de l'hydrogramme.

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).

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 :

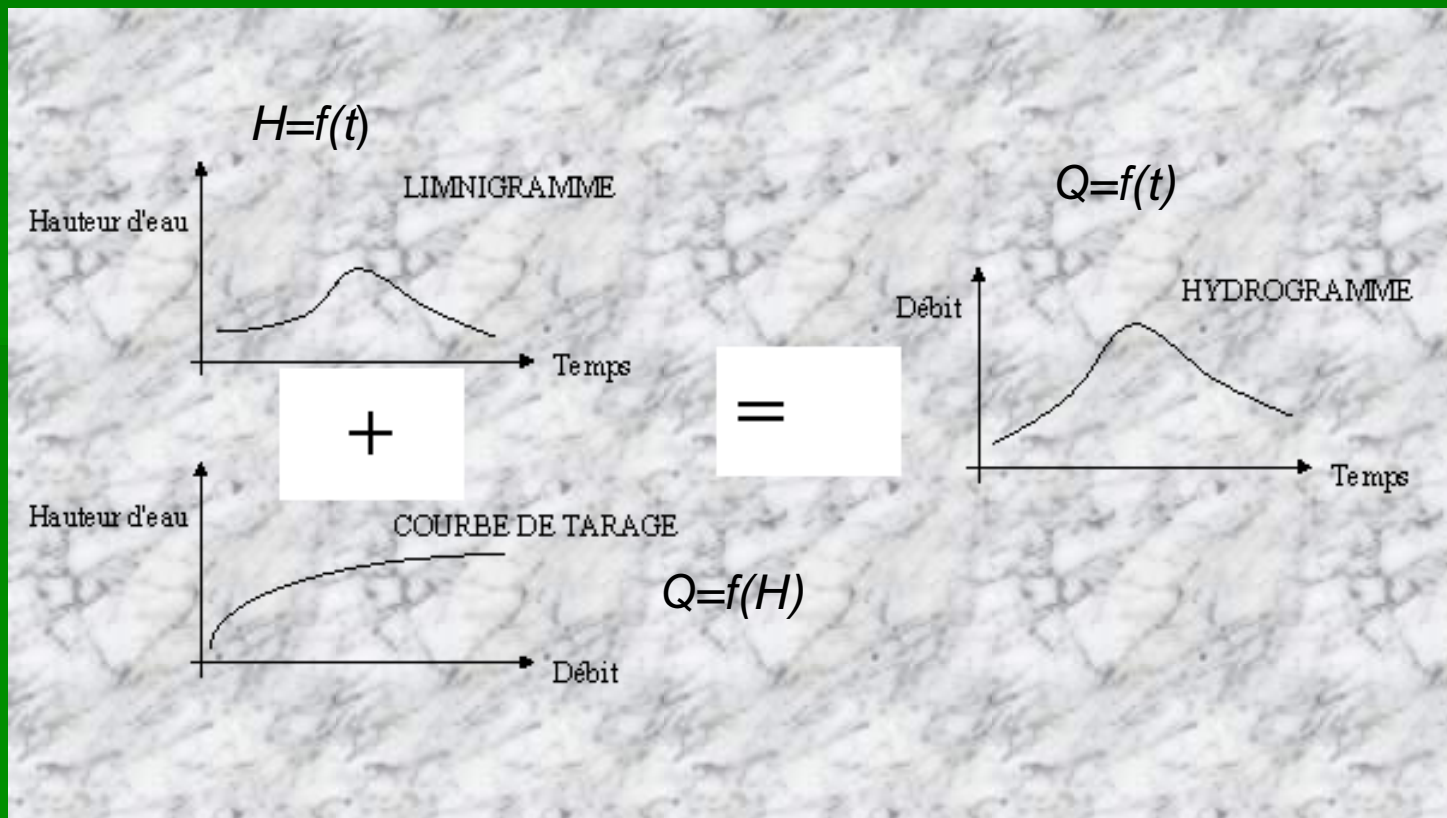
- on enregistre en un point du cours d'eau (la station hydrométrique), la hauteur d'eau H en fonction du temps. Cet enregistrement **$H(t)$ est appelé "limnigramme"**
- A différents instants $t = t_1, t_2, \dots, t_n$, on pratique des mesures instantanées de débits $Q_{t1}, Q_{t2}, \dots, Q_{tn}$; ces 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_{ti}, H_{ti}) permettent d'établir **la relation hauteur-débit appelée courbe de tarage : $Q(H)$** .
- en combinant la courbe de tarage $Q(H)$ et le limnigramme $H(t)$, on obtient aisément **l'évolution du débit en fonction du temps $Q(t)$ appelé hydrogramme**.

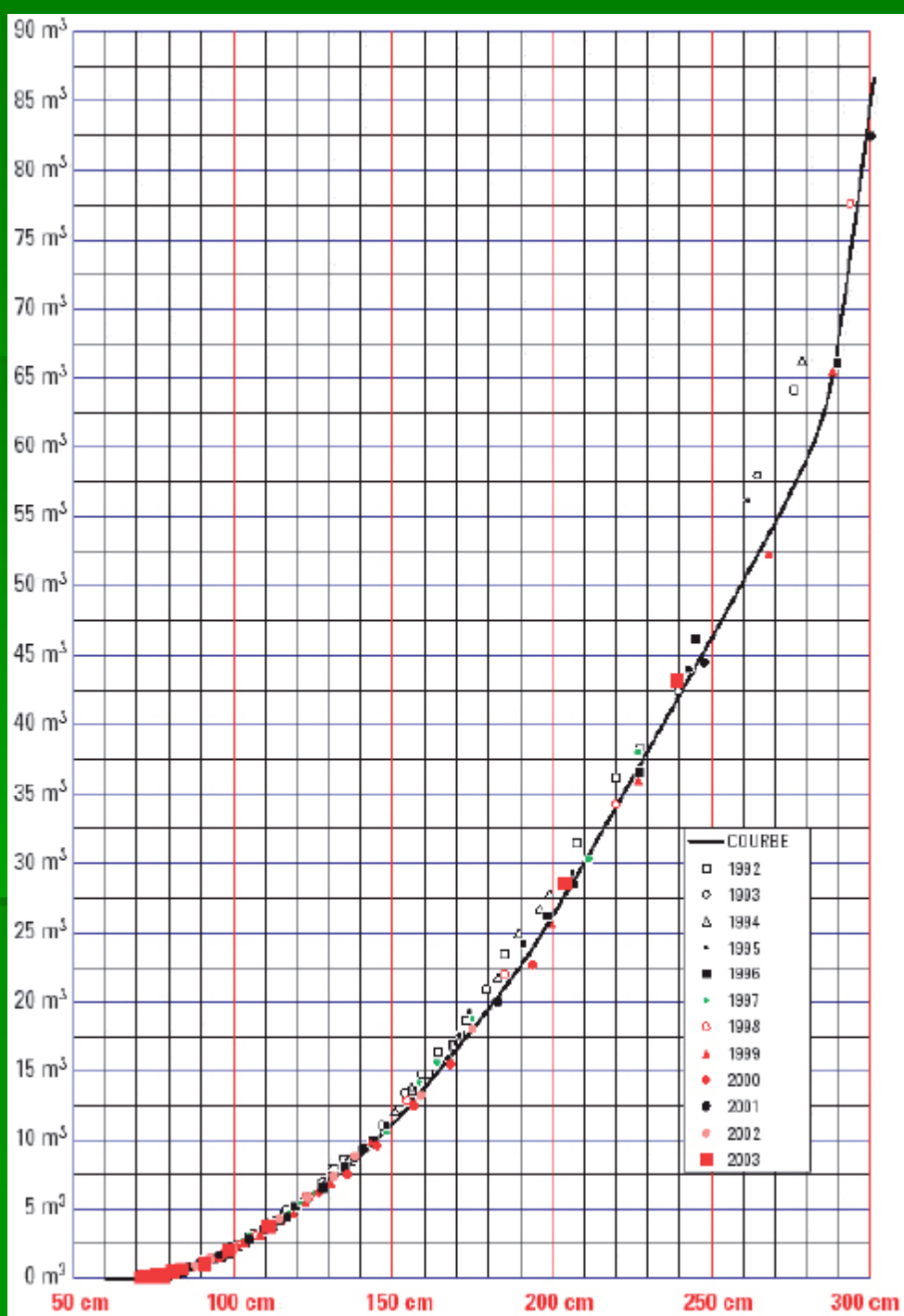
II- La mesure des débits

hydrométrie

la *limnimétrie*

la *débitmétrie*





II-1- La mesure des hauteurs d'eau

1-1- Le limnimètre

Le limnimètre est l'élément de base des dispositifs de lecture et d'enregistrement du niveau de l'eau :

il est constitué le plus souvent par une *échelle limnimétrique* qui est une règle ou une tige graduée en métal (éventuellement en bois ou en pierre), placée verticalement ou inclinée, et permettant la lecture directe de la hauteur d'eau à la station.



Echelles limnimétriques inclinée et verticale.

1-2- Le limnigraphe à flotteur

Le limnigraphe à flotteur est un appareil qui maintient un flotteur à la surface de l'eau grâce à un contrepoids, par l'intermédiaire d'un câble et d'une poulie. Le flotteur suit les fluctuations du niveau d'eau, qui sont reportées sur un graphe solidaire d'un tambour rotatif (à raison d'un tour par 24h ou par semaine ou par mois). La précision de la mesure est de 5 mm environ.

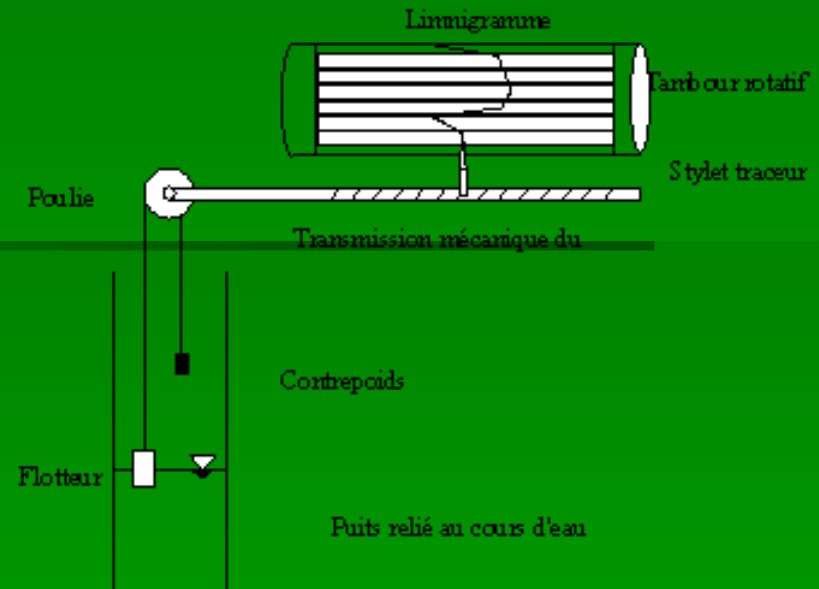


Schéma du limnigraphe à flotteur.

1-3- Le limnigraphe à pression

Le limnigraphe à pression ou "bulle à bulle", mesure les variations de pression causées par les changements de niveau d'eau. Cet appareil comprend une bonbonne de gaz comprimé, un dispositif de contrôle de pression et un tube immergé relié à la bonbonne. Un débit d'air constant sous pression est envoyé au fond de la rivière. Par un manomètre à mercure, on mesure la pression de l'air dans le tube qui est proportionnelle à la hauteur d'eau au-dessus de la prise installée dans la rivière.



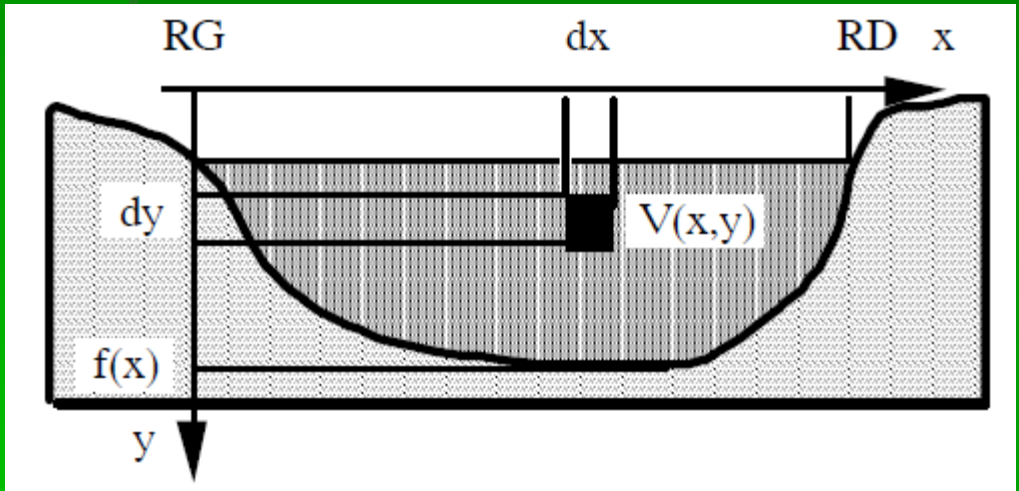


LES METHODES DE JAUGEAGES

Un jaugeage est 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.

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...

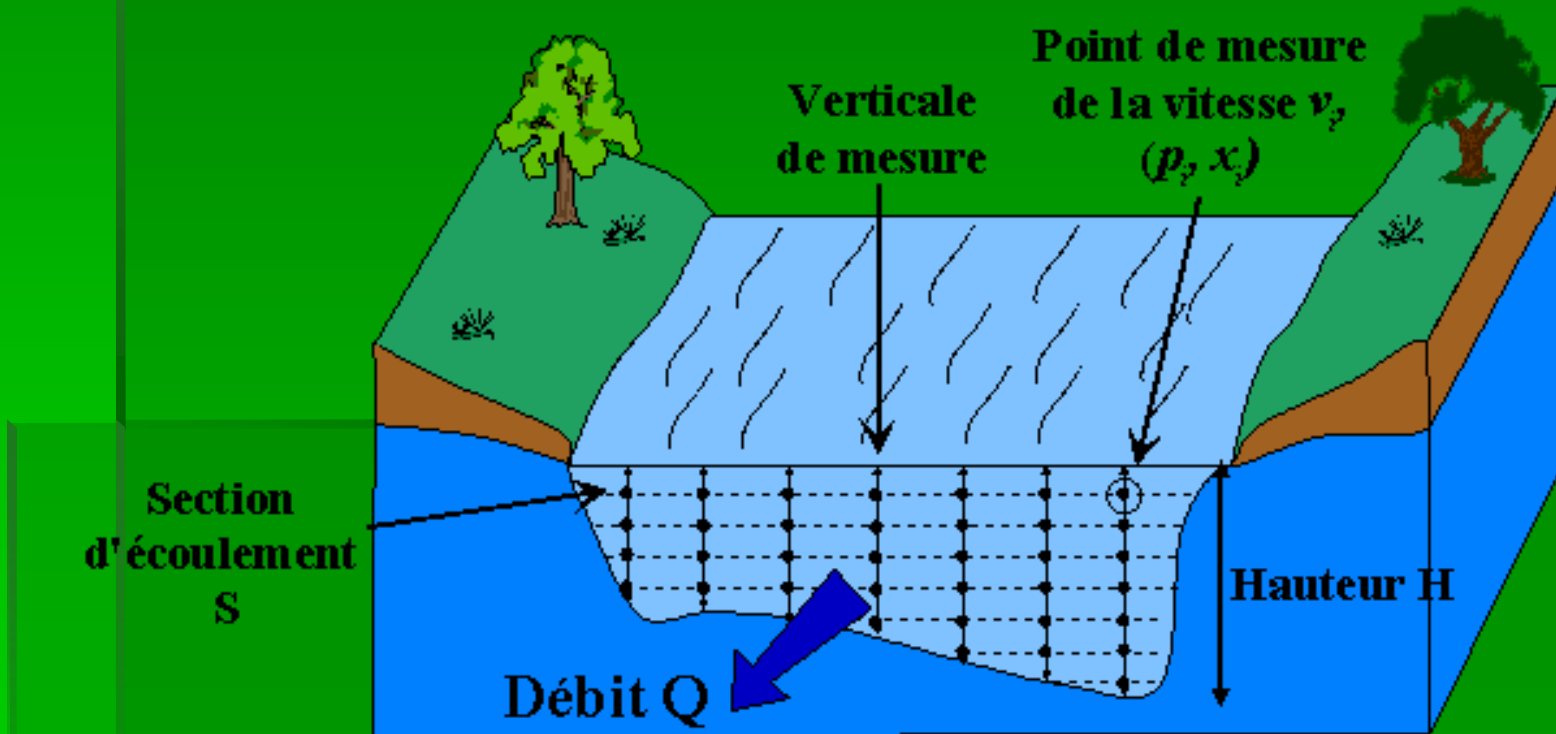
$$Q = \int_S \mathbf{V} \cdot d\mathbf{s} \quad \text{ou plus explicitement} \quad Q = \int_{RG}^{RD} \int_0^{f(x)} V(x,y) \cdot dy \cdot dx$$



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".

Le jaugeage par exploration du champ de vitesse

Le débit Q [m³/s] s'écoulant dans une section d'écoulement S [m²] d'une rivière peut être défini à partir de la vitesse moyenne V [m/s] perpendiculaire à cette section par la relation : $Q = V \cdot S$.



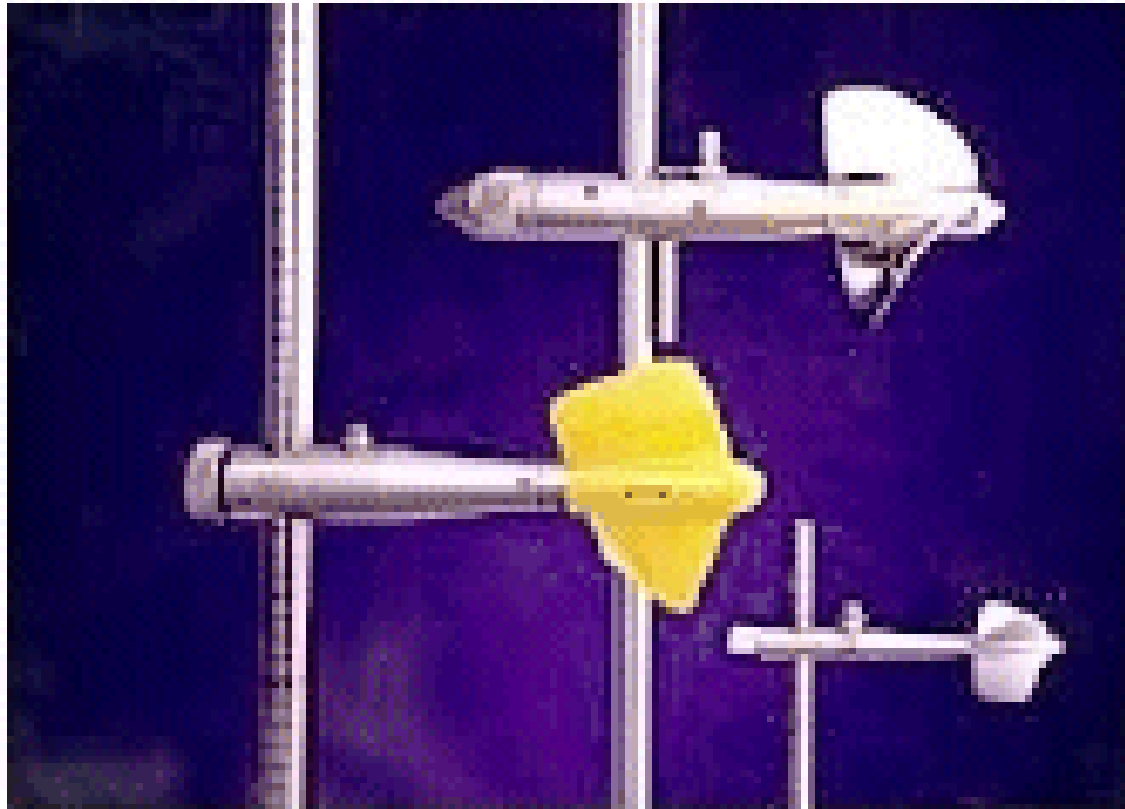
Débit et champ des vitesses à travers une section

Le jaugeage au moulinet

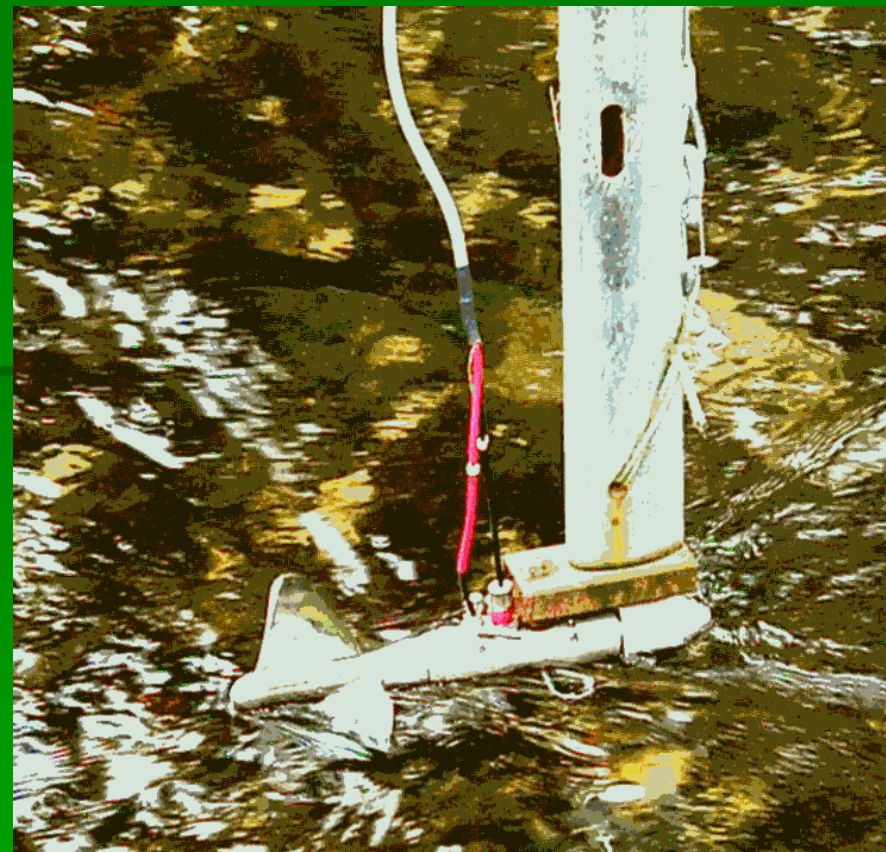
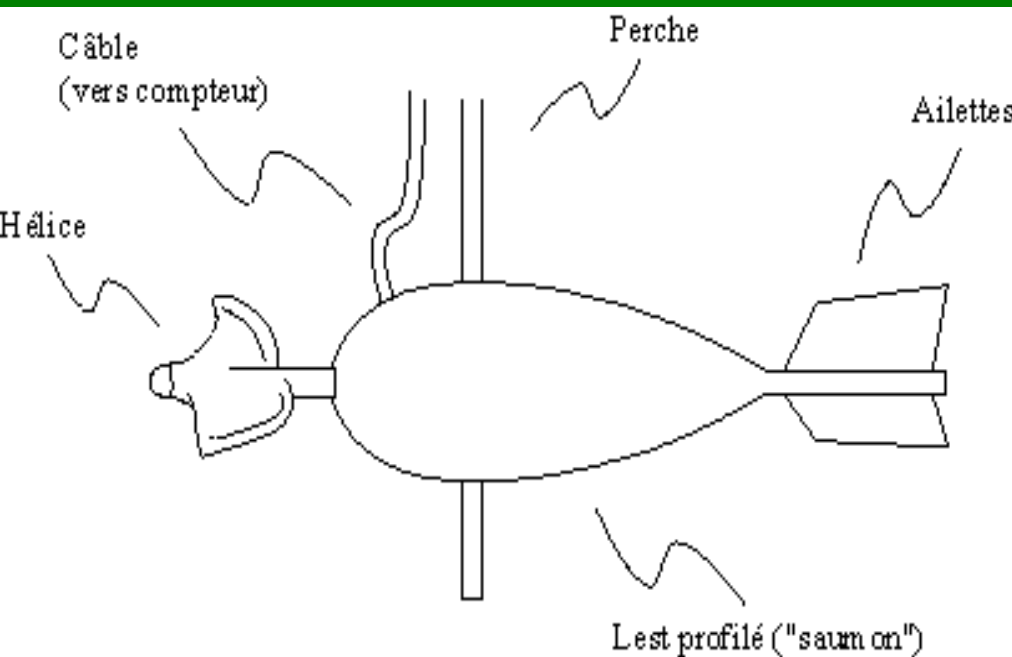
Le moulinet hydrométrique permet de mesurer la vitesse ponctuelle de l'écoulement. Le nombre de mesures sur une verticale est choisi de façon à obtenir une bonne description de la répartition des vitesses sur cette verticale. De manière générale, on fera entre 1, 3 ou 5 mesures suivant la profondeur du lit.

La vitesse d'écoulement est mesurée en chacun des points à partir de la vitesse de rotation de l'hélice située à l'avant du moulinet (nombre de tours n par unité de temps). La fonction $v = f(n)$ est établie par une opération d'étalonnage (courbe de tarage du moulinet). Suivant le mode opératoire adopté pour le jaugeage, le moulinet peut être monté sur une perche rigide ou sur un lest profilé appelé "saumon"









Adaptation du moulinet aux différents modes opératoires

- Dans le cas du montage sur perche, le moulinet peut être manœuvré de deux manières :
- directement par l'opérateur placé dans l'écoulement (jaugeage à gué), la perche reposant sur le fond du lit du cours d'eau. Cette méthode est utilisable dans des sections de profondeur inférieure à 1 mètre et avec des vitesses d'écoulement inférieures à 1 m/s.
 - à partir d'une passerelle, la perche étant suspendue à un support permettant les déplacements verticaux.

Méthodes et limites des différents modes opératoires du jaugeage au moulinet monté sur un lest.

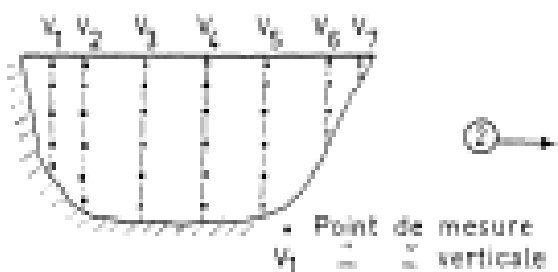
Modes opératoires	Limites de la méthode
Mesures à partir d'un pont	Profondeur < 10 m et vitesse < 2 m/s
Mesure à l'aide d'un canot	Profondeur < 10 m et vitesse < 2 m/s
Mesures à partir de stations téléphériques	Lorsque les vitesses à mesurer dépassent 3 m/s
Mesures à partir d'un bateau mobile	Lorsque la rivière est large (> 200 m), uniforme et sans présence de hauts-fonds afin d'y manœuvrer facilement.

Enfin, le calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement sur l'ensemble de la section S de longueur L se fait par intégration des vitesses v_i définies en chacun des points de la section de profondeur p_i (variant pour chaque verticale de 0 à une profondeur maximale P) et d'abscisse x_i (variant pour chaque verticale de 0 à L) :

$$Q = \int_S \int V \cdot dS = \int_0^L \int_0^P v_i \cdot dp \cdot dx$$

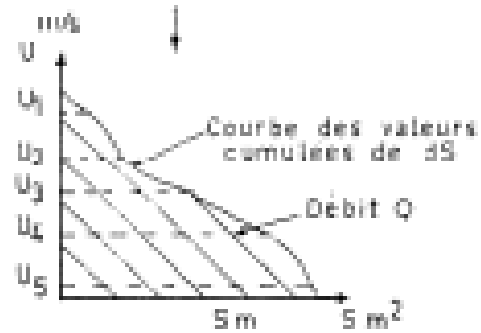
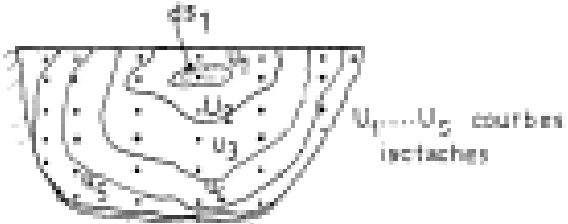


Jaugeage point par point



①

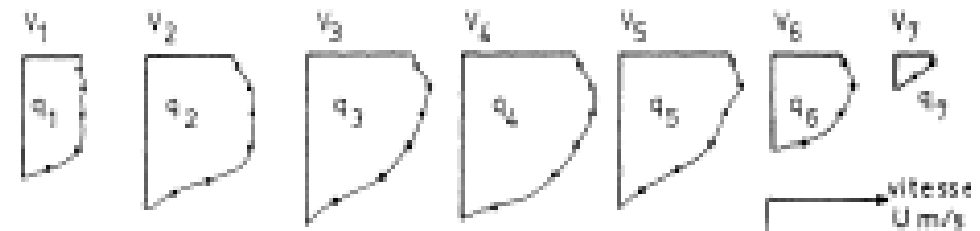
Tracé des courbes notches



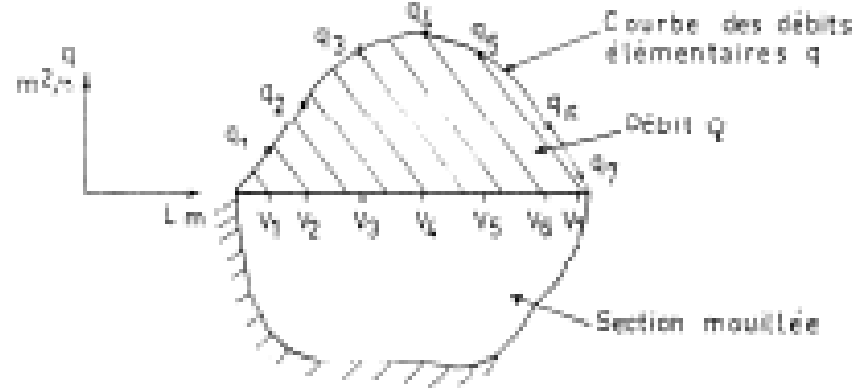
S_5 : section mouillée

Vitesse moyenne $U = \frac{Q}{S_5}$

Parabole des vitesses

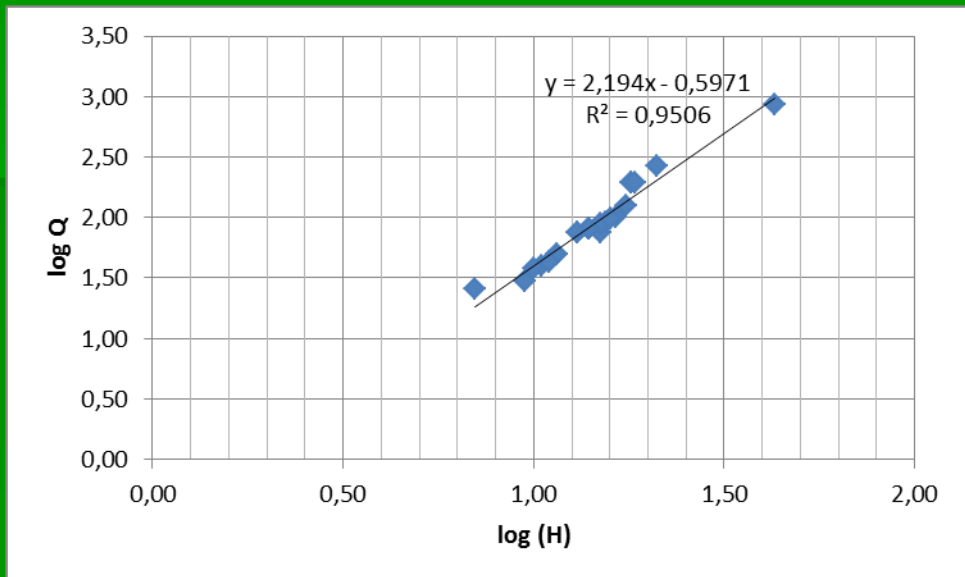
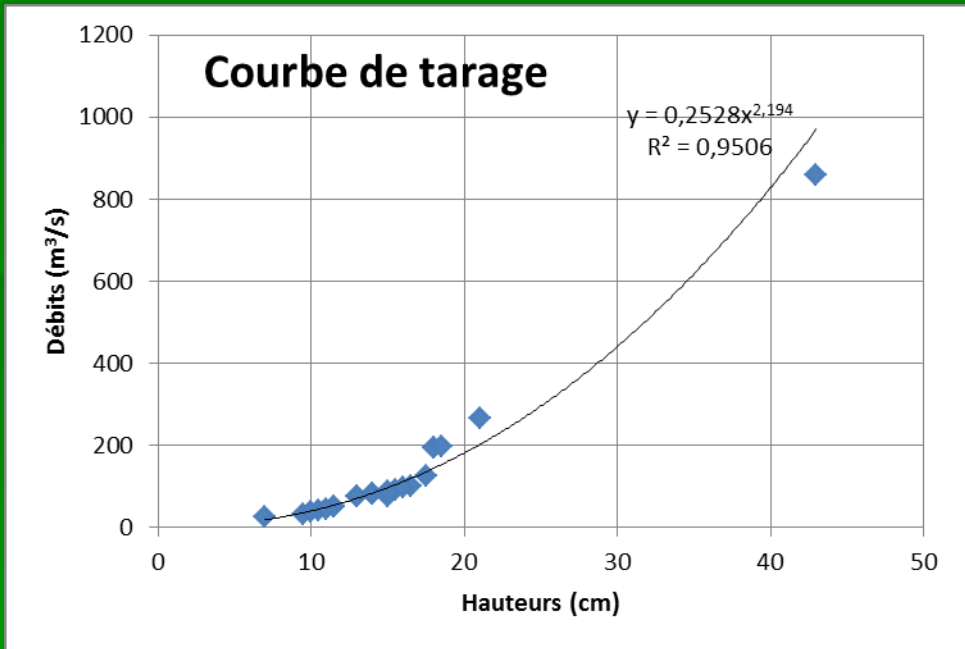


Chaque surface équivaut à $q \text{ m}^2/\text{s} = U \text{ m/s} \times pm$



COURBE DE TARRAGE OUED SEBDOU

H(cm)	Q(L/s)	log H	LogQ
43	860	1.63	2.93
18	193	1.26	2.29
21	267	1.32	2.43
15	75	1.18	1.88
16.5	100	1.22	2.00
13	75	1.11	1.88
14	80	1.15	1.90
18	193	1.26	2.29
11.5	50	1.06	1.70
11.5	50	1.06	1.70
10.5	40	1.02	1.60
11	43	1.04	1.63
15.5	91	1.19	1.96
15	89	1.18	1.95
14	80	1.15	1.90
9.5	30	0.98	1.48
17.5	124	1.24	2.09
14	80	1.15	1.90
13	75	1.11	1.88
18.5	196	1.27	2.29
16	98	1.20	1.99
10	38	1	1.58
7	26	0.85	1.41



Le jaugeage au flotteur

Lorsque le jaugeage au moulinet ne peut pas être effectué en raison de vitesses et de profondeurs excessives ou au contraire trop faibles, ou de la présence de matériaux en suspension, il est possible de mesurer la vitesse d'écoulement au moyen de flotteurs. Il s'agit dans cette méthode de mesurer uniquement des vitesses de surface, ou plus exactement les vitesses dans la tranche superficielle de l'écoulement (les 20 premiers centimètres environ).

Les flotteurs peuvent être soit artificiels (bouteilles en plastiques) soit naturels (arbres, grosses branches, etc.). Le déplacement horizontal d'un flotteur de surface durant un temps t permet de déterminer la vitesse de l'écoulement de surface. Plusieurs mesures de vitesse du flotteur doivent être réalisées. La moyenne de ces mesures est ensuite multipliée par un coefficient approprié pour obtenir la vitesse moyenne de l'élément de section. En général, la vitesse moyenne dans la section est de l'ordre de 0,4 à 0,9 fois la vitesse de surface.

Cette méthode donne de bonnes approximations du débit, parfois suffisantes pour les études envisagées.

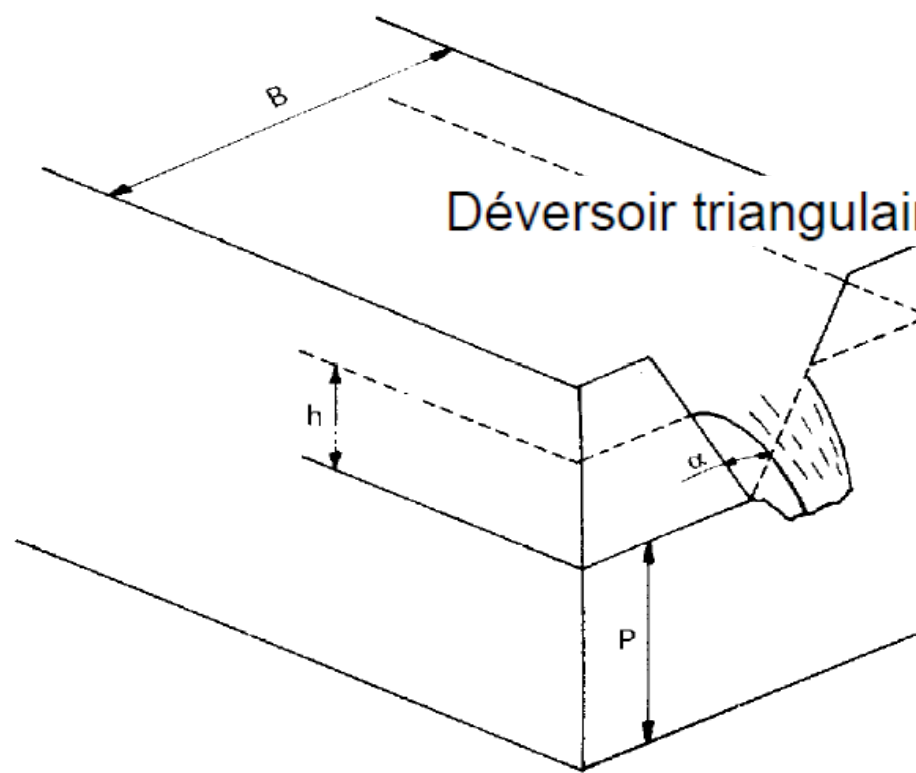
La détermination du débit à l'aide d'ouvrages calibrés

La construction d'un déversoir ou d'un canal calibré pour la détermination des débits d'un cours d'eau a pour but l'obtention d'une relation entre le niveau de l'eau H et le débit Q aussi stable que possible, et en principe sans jaugeage sur le terrain. Le débit est alors obtenu par des formules hydrauliques et par étalonnage sur modèles. Les canaux jaugeurs et les déversoirs calibrés sont notamment utilisés dans le cas de petits cours d'eau aux lits étroits, instables, encombrés de blocs et à faible tirant d'eau, pour lesquels l'installation de stations à échelles limnimétriques et l'exécution de jaugeages au moulinet ne sont pas recommandés. Leur fonctionnement obéit aux lois de l'hydraulique classique.



Déversoir triangulaire en mince paroi et canal de Venturi.





Déversoir triangulaire à paroi mince

La formule générale du débit pour un déversoir triangulaire en mince paroi est :

$$Q = c_e \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} h_e^{5/2}$$

Où :

- Q est le débit (m^3s^{-1})
- c_e le coefficient de débit $f(\alpha, h/p, p/B)$
- g l'accélération de la pesanteur (m^2s^{-1})
 - l'angle formé par les parois de l'échancrure
- h_e la charge piézométrique fictive ou hauteur de la surface liquide amont par rapport au point bas de l'échancrure (m).

Trois dimensions de déversoirs triangulaires sont recommandées par l'Organisation Internationale de Normalisation :

- L'échancrure type 90° où l'écartement des sommets de l'échancrure est égal à deux fois la hauteur verticale correspondante ($\text{tg } \alpha/2 = 1$)
- L'échancrure type $1/2$ ($\alpha = 53^\circ 8'$) où l'écartement des sommets de l'échancrure est égal à la hauteur verticale correspondante ($\text{tg } \alpha/2 = 0.5$)
- L'échancrure type $1/4$ ($\alpha = 28^\circ 4'$) où l'écartement des sommets de l'échancrure est égal à la moitié de la hauteur verticale correspondante ($\text{tg } \alpha/2 = 0.25$).

Si le lit et les parois du canal d'approche sont éloignés de l'échancrure on peut se servir des formules suivantes :

– - échancrure type 90° $Q = c_e \frac{8}{15} \sqrt{2g} h_e^{5/2}$

– - échancrure type $1/2$ $Q = c_e \frac{4}{15} \sqrt{2g} h_e^{5/2}$

– - échancrure type $1/4$ $Q = c_e \frac{2}{15} \sqrt{2g} h_e^{5/2}$

$$0.58 < C_e < 0.61$$

- Canaux Venturi - Jaugeur Parshall. Ce type d'équipements sera préféré aux seuils pour les stations à fort charriage, ces derniers présentant toujours des inconvénients non négligeables concernant les affouillements en aval, l'ensablement amont, la surélévation du plan d'eau amont, etc.

La formule générale d'un jaugeur à ressaut dénoyé est de la forme :

$$Q = kc l_2 \sqrt{2g} h^{3/2}$$

où :

- Q est le débit
- k un coefficient variant de 0.95 à 1.00 suivant les jaugeurs
- c un coefficient fonction des largeurs l_1 et l_2
- l_2 largeur de la partie rétrécie
- l_1 largeur de la partie large en amont
- g accélération de la pesanteur
- h cote du plan d'eau au dessus des radiers en amont dans la partie de largeur l_1 .

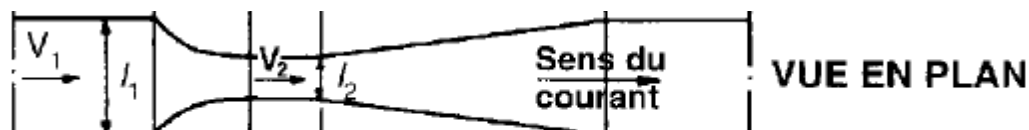
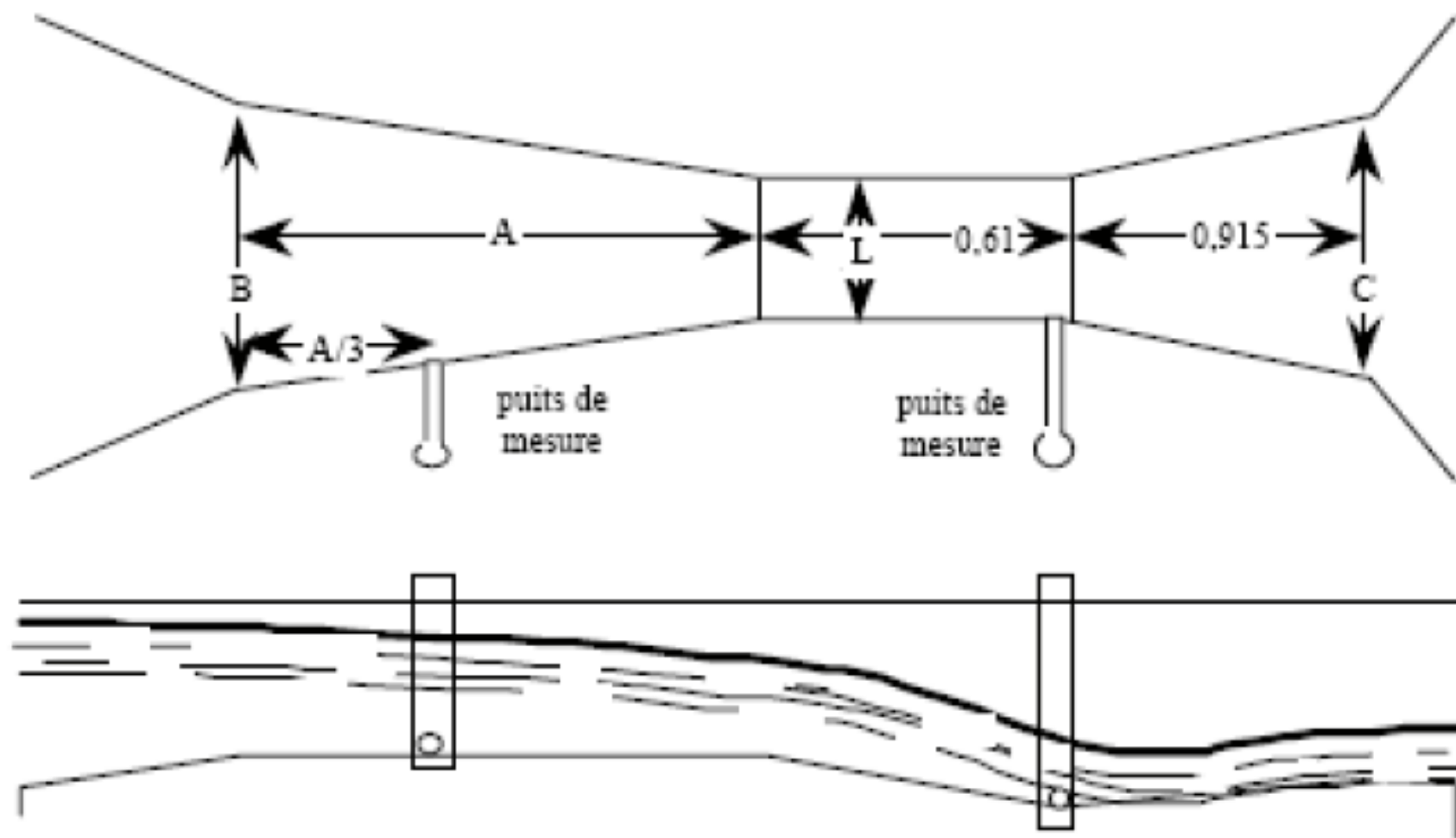


Figure 1.10.: Jaugeur à ressaut : schéma de principe



Les jaugages par dilution

Cette méthode s'applique à des torrents ou des rivières en forte pente où l'écoulement est turbulent ou pour lesquels on ne trouve pas de section se prêtant à des jaugages au moulinet.

Le principe général consiste à injecter dans la rivière une solution concentrée d'un traceur (sel, colorant,...) et à rechercher dans quelle proportion cette solution a été diluée par la rivière, par prélèvements d'échantillons d'eau à l'aval du point d'injection (Fig. 7.16). Cette dilution est notamment fonction du débit, supposé constant le long du tronçon, concerné pendant la durée de la mesure. On a la relation suivante dans laquelle le rapport C_1 / C_2 représente la dilution :

$$Q = k \times \left(\frac{C_1}{C_2} \right)$$

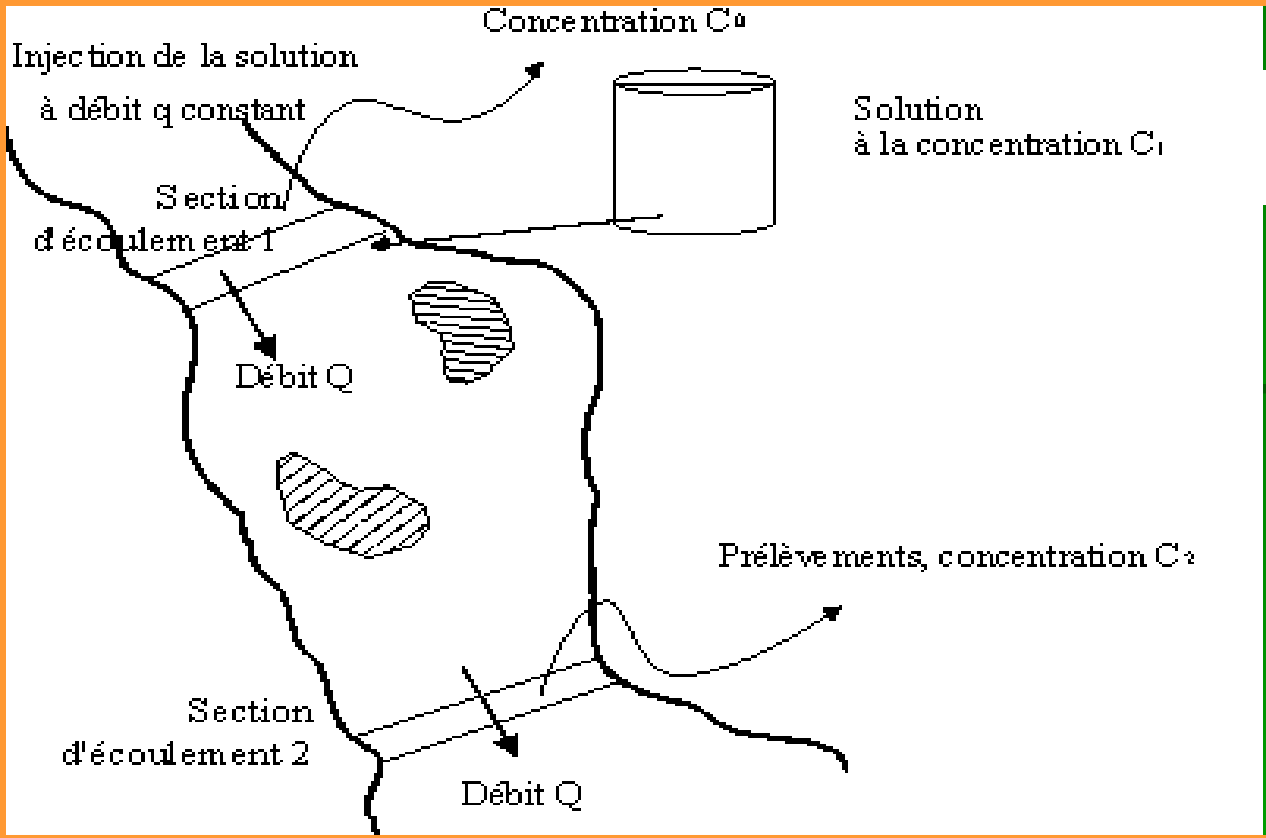
Où

Q : débit du cours d'eau [l/s] ;

C_1 : concentration de la solution injectée dans le cours d'eau [g/l] ;

C_2 : concentration de la solution restante dans des échantillons prélevés à l'aval du point d'injection dans le cours d'eau [g/l] ;

k : coefficient caractéristique du procédé et du matériel utilisé



Principe du jaugeage par dilution; mode opératoire

Les conditions suivantes sont nécessaires pour que les méthodes par intégration ou dilution puissent être appliquées :

- le débit de la rivière doit rester à peu près constant pendant la mesure ;
- le traceur doit passer dans sa totalité par l'emplacement de prélèvement des échantillons ;
- à la hauteur des prélèvements, le mélange doit être tel qu'en chaque point de la section du cours d'eau, doit passer la même quantité de traceur.
- On utilise différents traceurs minéraux ou organiques, tels que la fluorescéine ou la rhodamine. Suivant le débit à évaluer, on n'utilisera pas le même traceurs.

Méthode de l'injection à débit constant

Cette méthode consiste à injecter dans le cours d'eau un débit constant connu q d'une solution de traceur, à la concentration C_1 (solution mère), pendant un temps déterminé. La durée de l'injection doit être telle que la concentration C_2 du traceur à la section de prélèvement reste constante pendant un certain laps de temps, appelé « palier ».

A partir des hypothèses suivantes :

- le débit Q du cours d'eau est constant pendant la mesure (régime permanent),
- le débit q du traceur à la section de prélèvement est égal à celui de l'injection (pas de pertes), et négligeable devant Q ,
- le mélange est homogène à la section de prélèvement,

alors, et dans l'hypothèse de la conservation de la masse de traceur, on a :

$$Q = q \times \left(\frac{C_1}{C_2} \right)$$

Jaugeage à débit constant



Méthode par intégration (injection instantanée)

Cette méthode consiste à injecter en un point du cours d'eau un volume V de traceur en solution concentrée C_1 . Au terme d'un parcours suffisamment long pour que le mélange avec l'eau de la rivière soit bon, des échantillons sont prélevés, et cela pendant toute la durée T de passage du nuage de traceur. Les prélèvements sont effectués en plusieurs points de la section d'échantillonnage de façon à fournir une valeur moyenne de la concentration C_2 qui évolue en fonction du temps et du point de prélèvement.

L'intégration au cours du temps des différentes valeurs de concentration $C_2(t)$ donne une valeur moyenne .

Dans l'hypothèse de la conservation de la masse du traceur, on peut exprimer le débit comme suit :

$$Q = \frac{M}{\int_0^T C_2(t) dt} = \frac{V \times C_1}{T \times \overline{C_2}}$$

Avec :

Q : débit du cours d'eau [l/s ou m³/s] ; _____

M : masse de traceur injecté [g] ; $M = V \cdot C_1$;

V : volume de la solution lâchée dans le cours d'eau [l ou m³] ;

C_1 : concentration de la solution lâchée dans le cours d'eau [g/l] ;

$\overline{C_2}$: concentration moyenne du traceur dans les échantillons, obtenue par intégration [g/l] ;

$C_2(t)$: concentration de l'échantillon prélevé au temps t [g/l] ;

T : durée du prélèvement [s].

Cas particulier du jaugeage au sel à l'aide d'une sonde conductimétrique

Dans ce cas, on injecte en un point du cours d'eau une masse connue de sel (NaCl) diluée dans un volume d'eau de la rivière. On place une sonde conductimétrique en aval de l'injection, à une distance suffisamment longue pour que le mélange soit bon. La sonde mesure la conductivité électrique de l'eau au cours du passage du nuage de sel. On peut alors tracer la courbe conductivité en fonction du temps.

Une relation linéaire existe entre la conductivité de l'eau et sa concentration en sel dissous. On peut donc en déduire la courbe concentration en fonction du temps. Le débit est alors obtenu par intégration de la concentration au cours du temps.

Tableau 4.5. – Programme intégral. Exemple de données de « sortie » par l'ordinateur pour contrôle des résultats par l'homme.

JAUGEAGE AU MOULINET		LE : 30/09/74 A 09/43/22							
LIEU : PT DES LANCHES		DATE : 26.2.74							
RIVIERE : PONTURIN		JAUGEAGE N : 87							
RESULTATS DE VITESSES APRES CLASSEMENT DES ABSCSSES ET ORDONNEES									
ABSCISSE :	0.50	ABSCISSE :	0.80	ABSCISSE :	1.30	ABSCISSE :	1.80	ABSCISSE :	2.30
ORDONNEE	VITESSE	ORDONNEE	VITESSE	ORDONNEE	VITESSE	ORDONNEE	VITESSE	ORDONNEE	VITESSE
METRES	M/S	METRES	M/S	METRES	M/S	METRES	M/S	METRES	M/S
	0.150		0.190		0.140		0.120		0.150
	0.120		0.160		0.110		0.090		0.100
	0.373		0.480		0.323		0.516		0.229
	0.100		0.150		0.090		0.393		0.080
	0.313		0.514		0.090		0.080		0.559
	0.080		0.120		0.070		0.509		0.070
	0.268		0.571		0.070		0.615		0.060
	0.060		0.634		0.050		0.649		0.050
	0.224		0.640		0.050		0.665		0.288
	0.030		0.640		0.030		0.683		0.030
	0.244		0.030		0.646		0.030		0.693
									0.303
ABSCISSE :	2.80	ABSCISSE :	3.30	ABSCISSE :	3.80	ABSCISSE :	4.30	ABSCISSE :	4.85
ORDONNEE	VITESSE	ORDONNEE	VITESSE	ORDONNEE	VITESSE	ORDONNEE	VITESSE	ORDONNEE	VITESSE
METRES	M/S	METRES	M/S	METRES	M/S	METRES	M/S	METRES	M/S
	0.140		0.140		0.120		0.100		0.070
	0.110		0.110		0.090		0.516		0.204
	0.373		0.224		0.090		0.070		0.040
	0.100		0.229		0.070		0.584		0.060
	0.403		0.100		0.224		0.634		0.179
	0.090		0.224		0.050		0.627		0.050
	0.442		0.244		0.040		0.040		0.174
	0.070		0.244		0.050		0.282		0.282
	0.472		0.070		0.527				
	0.030		0.562		0.030				
CALCUL DES PU									
RIVE GAUCHE		0.300							
ABSCISSE :	1 =	0.500	PU =	0.0431	M2/S				
ABSCISSE :	2 =	0.800	PU =	0.1084	M2/S				
ABSCISSE :	3 =	1.300	PU =	0.0684	M2/S				
ABSCISSE :	4 =	1.800	PU =	0.0711	M2/S				
ABSCISSE :	5 =	2.300	PU =	0.0340	M2/S				
ABSCISSE :	6 =	2.800	PU =	0.0634	M2/S				
ABSCISSE :	7 =	3.300	PU =	0.0501	M2/S				
ABSCISSE :	8 =	3.800	PU =	0.0732	M2/S				
ABSCISSE :	9 =	4.300	PU =	0.0101	M2/S				
ABSCISSE :	10 =	4.850	PU =	0.0166	M2/S				
RIVE DROITE		5.000							
CALCUL DU DEBIT									
Q =	0.2451			M3/S					