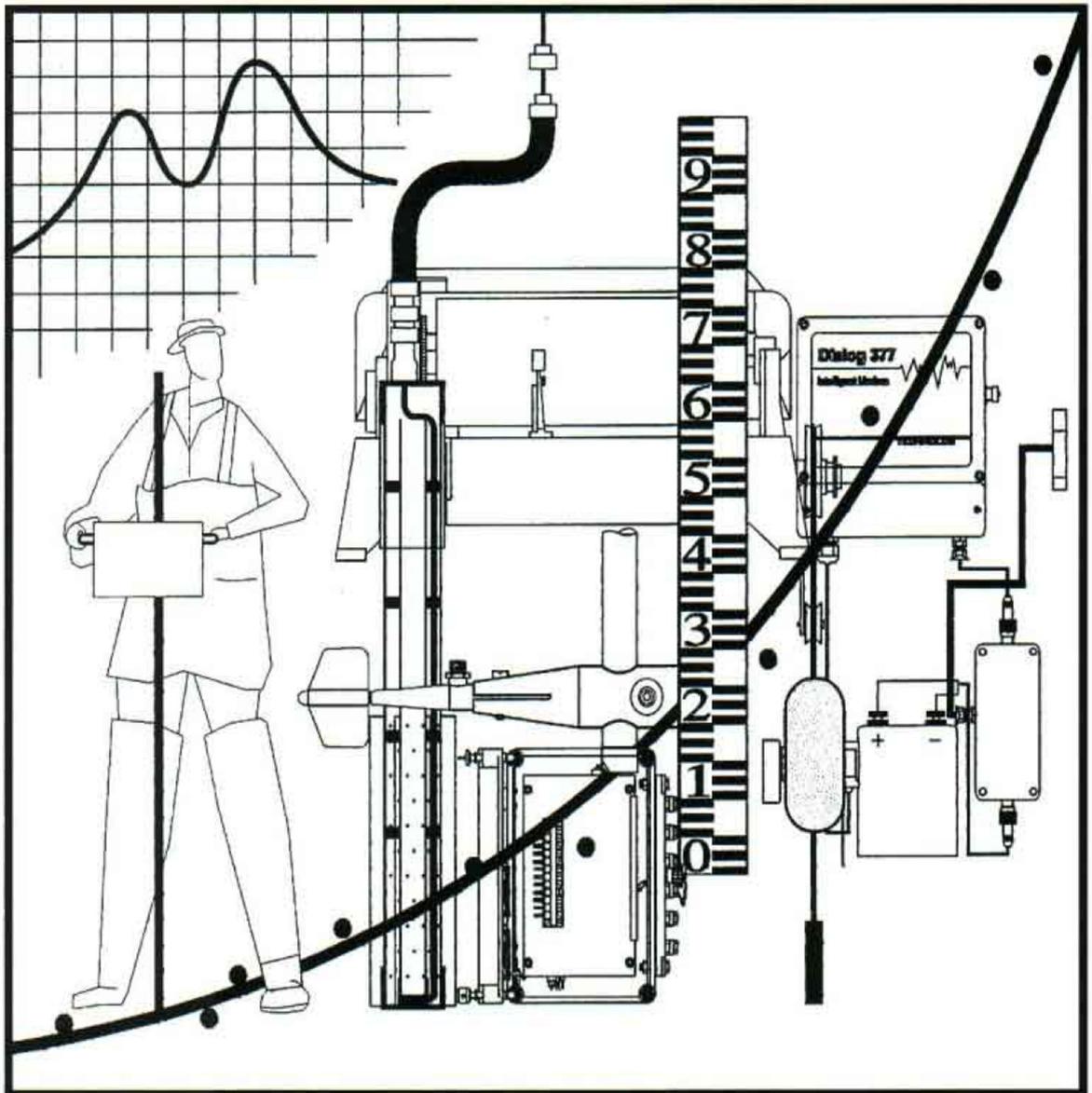


HYDROMETRIE



SOMMAIRE

1	LA STATION HYDROMETRIQUE	3
1.1	Introduction	3
1.2	Notion de débit instantané	3
1.3	Critères de choix	4
1.3.1	Adaptation aux mesures	4
1.3.2	Chenal unique	4
1.3.3	Stabilité du lit	4
1.3.4	Bief rectiligne	5
1.3.5	Sensibilité de la section	5
2	LA MESURE DES DEBITS	6
2.1	Le jaugeage au flotteur	6
2.2	Le jaugeage par exploration du champ de vitesse	7
2.2.1	Matériel de jaugeage	7
2.2.2	Dépouillement des jaugeages au moulinet et calcul des débits	8
2.2.3	Le courantomètre électromagnétique	10
2.3	La détermination du débit à l'aide d'ouvrages calibrés - Déversoir	12
2.3.1	Formes possibles:	12
2.3.2	Déversoirs triangulaires en mince paroi	13
2.3.3	Déversoirs rectangulaires en mince paroi	13
2.3.4	Montage d'un déversoir	14
2.3.5	Choix du type de déversoir en mince paroi	14
2.3.6	Montage d'un déversoir	15
2.3.7	Autres dispositifs	15
2.4	La mesure des hauteurs d'eau	16
2.4.1	Section transversale	16
2.4.2	Le limnimètre	17
2.4.3	Le limnigraphe à flotteur	20
2.5	Les jaugeages par dilution (méthode chimique)	21
2.5.1	Principe	21
2.5.2	Critères de choix	21

2.5.3	Méthodes de traçage et types d'injection	22
2.5.4	Précautions.....	22
2.5.5	Methode de mesure	22
3	Les capteurs de pression.....	25
4	Les capteurs de pression bulle à bulle	25
5	Capteurs à ultra-sons.....	26
6	L'acquisition et l'enregistrement des données	27
7	BIBLIOGRAPHIE.....	28

1 LA STATION HYDROMETRIQUE

1.1 INTRODUCTION

On appelle hydrométrie l'ensemble des techniques de mesures des différents paramètres caractérisant les écoulements dans les cours d'eau naturels ou artificiels et dans les conduites. Les deux variables principales qui caractérisent l'écoulement sont :

- La **cote de la surface d'eau libre**, notée H et exprimée en mètre. Sa mesure concerne la **limnimétrie**.
- Le **débit du cours d'eau**, noté Q et exprimé en m³/s ou l/s, représentant le volume total d'eau qui s'écoule à travers une section droite du cours d'eau pendant l'unité de temps considérée. Sa mesure est du ressort de la **débitmétrie**.

Le niveau d'eau dans un canal est facilement observable, mais n'est représentatif que de la section d'observation et peut être soumis à des modifications dans le temps. Seule la variable débit reflète physiquement le comportement du bassin versant, et peut être interprétée dans le temps et l'espace.

Les niveaux des rivières, des lacs ou des réservoirs servent directement à la prévision des écoulements, à la délimitation des zones exposées aux inondations, et à la conception d'ouvrages hydrauliques. Par leurs relations avec les débits des cours d'eau ou les volumes d'eau contenus dans les réservoirs et les lacs, les niveaux d'eau constituent l'information de base pour la détermination des débits ou des stocks.

Les critères de choix pour l'emplacement de la station doivent répondre à l'objectif final des observations et à l'accessibilité du site, compte tenu des propriétés géométriques et hydrauliques du bief. Les conditions hydrauliques constituent également un facteur important pour le choix du site le long de cours d'eau, particulièrement lorsque les niveaux d'eau sont utilisés pour le calcul des débits. Les stations sur les lacs et les réservoirs sont normalement situées près des exutoires, mais suffisamment en amont pour éviter l'influence du phénomène d'abaissement du niveau dû à l'augmentation de la vitesse.

1.2 NOTION DE DEBIT INSTANTANE

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

$$Q = \frac{V}{t}$$

Q débit (en m³/s)

V volume (en m³)

t temps (en s)

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

$$V = S \times L$$

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

$$\frac{L}{t} = v_{moy}$$

Le débit est donc donné par la relation :

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{S \times L}{t} = \frac{L}{t} \times S = v_{moy} \times S$$

1.3 CRITERES DE CHOIX

1.3.1 Adaptation aux mesures

Le site choisi doit permettre l'observation de tous les niveaux d'eau et le mesurage de tous les débits, qu'ils soient très faibles ou très élevés.

1.3.2 Chenal unique

Ceci implique que la totalité du débit passe dans la section de mesures (lit à **chenal unique**) et qu'un équipement limnimétrique puisse y être solidement installé sans risques de destruction, de submersion et d'émersion.

Ceci suppose aussi que les mesures soient effectuées dans de bonnes conditions : échelle bien lisible sans risque, surface libre plate et stable (quel que soit le débit), écoulement lent pour les jaugeages au moulinet ou à fort brassage latéral pour les techniques de dilution chimique.

1.3.3 Stabilité du lit

La relation hauteur-débit d'une station hydrométrique doit être aussi stable que possible. Il faut pour cela choisir un bief, creusé dans un matériau résistant ou du moins de bonne cohésion et surtout rechercher, de manière systématique, les contrôles permanents et si possible complets.

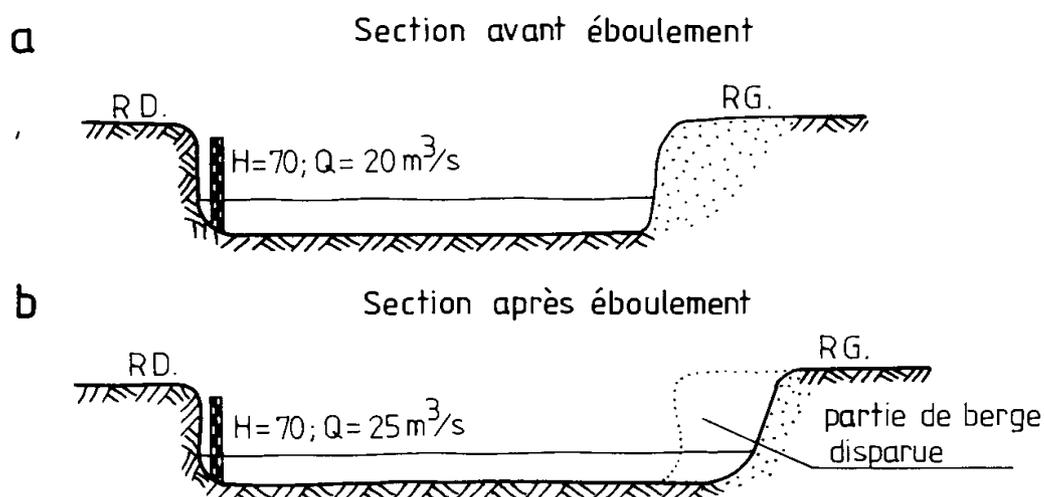


Figure 1 : Evolution d'une section à berges instables.

1.3.4 Bief rectiligne

Le bief de mesure doit être le plus rectiligne possible. L'emplacement de la section de mesure doit être éloigné de tout coude ou obstacle, naturel ou artificiel, engendrant des perturbations hydrauliques. La section de mesure doit être perpendiculaire à l'écoulement.

1.3.5 Sensibilité de la section

La sensibilité d'une station est d'autant meilleure qu'une grande variation de la hauteur lue à l'échelle correspond à une faible augmentation du débit traversant la section de l'échelle.

La sensibilité d'une station est meilleure dans les sections étroites et profondes (forte variation du niveau d'eau) et à régime d'écoulement lent (donc fluvial).

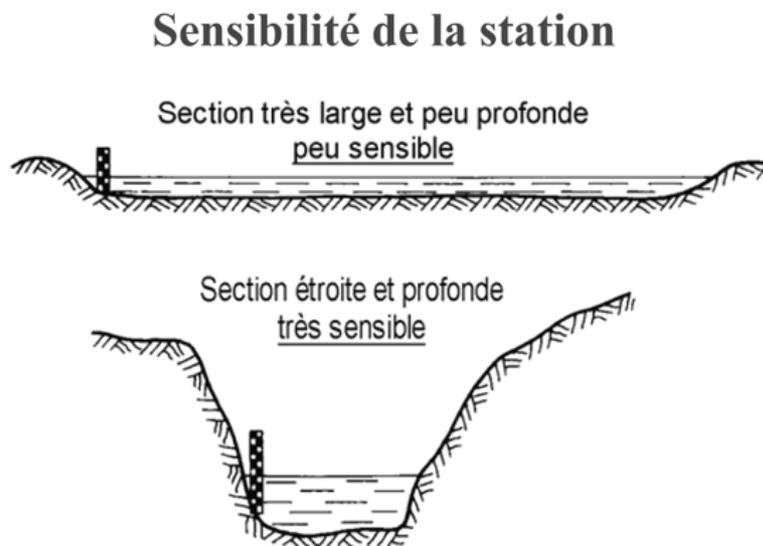


Figure 2 : Sensibilité d'une section de mesure limnimétrique.

2 LA MESURE DES DEBITS

Pour mesurer le débit d'un écoulement naturel (cours d'eau, canal, dérivation...), il existe quatre grandes catégories de méthodes.

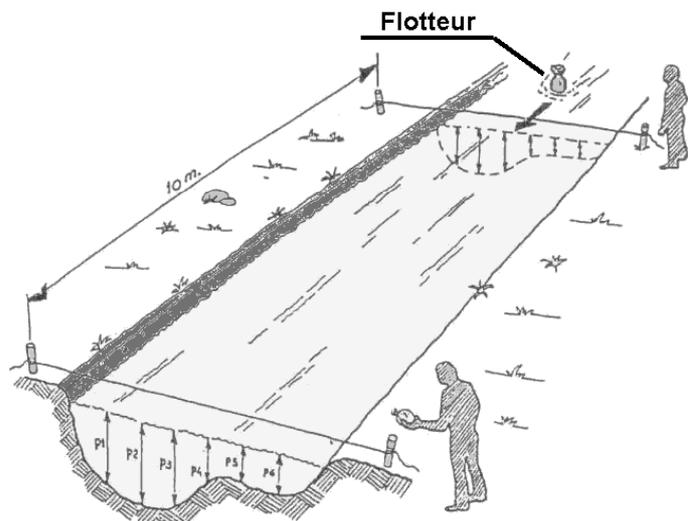
- ⌚ Les méthodes "**volumétriques**" (ou jaugeage capacitif) permettent de déterminer le débit directement à partir du temps nécessaire pour remplir d'eau un récipient d'une contenance déterminée. Compte tenu des aspects pratiques inhérents à la méthode de mesure (taille du récipient nécessaire, incertitude sur la mesure du temps, aménagement spécifique éventuel), cette méthode n'est généralement pratiquée que pour des débits très faibles, quelques l/s au plus.
- ⌚ Les méthodes "**d'exploration du champ de vitesse**" consistent à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section, tout en mesurant la surface de la section mouillée. Ces techniques nécessitent un matériel spécifique (moulinet, perche, saumon, courantomètre...) et un personnel formé à son utilisation. Parmi les nombreuses méthodes d'exploration du champ de vitesse, les jaugeages au moulinet et au flotteur sont présentés ci-dessous, ainsi que le principe de fonctionnement des capteurs électromagnétiques.
- ⌚ Les méthodes "**hydrauliques**" tiennent compte des forces qui régissent l'écoulement (pesanteur, inertie, viscosité...). Ces méthodes obéissent aux lois de l'hydraulique.
- ⌚ Les méthodes "**physico-chimiques**" prennent en compte les variations, lors de l'écoulement, de certaines propriétés physiques du liquide (concentration en certains éléments dissous). Ces méthodes consistent généralement à injecter dans le cours d'eau un corps en solution, et à suivre l'évolution de sa concentration au cours du temps. Ce sont les méthodes dites «par dilution» ou encore «chimique».

Toutes ces méthodes de mesures des débits nécessitent généralement un régime d'écoulement en régime fluvial, sauf les jaugeages chimiques, qui sont appropriés en cas d'écoulement torrentiel.

2.1 LE JAUGEAGE AU FLOTTEUR

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.



Mesure de la vitesse

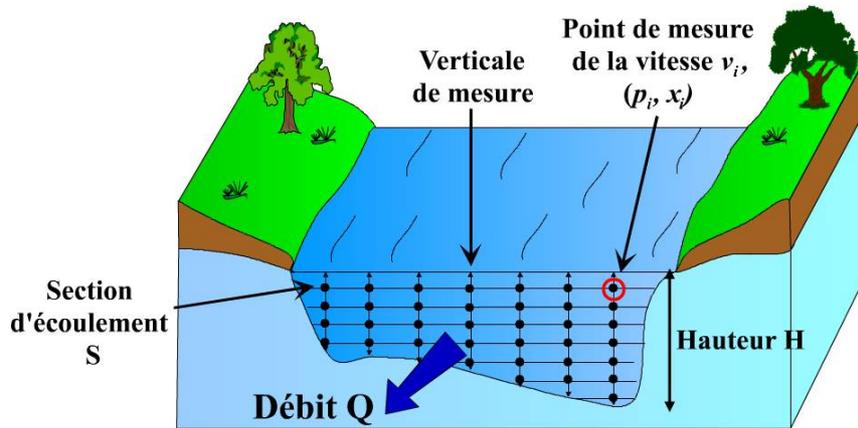
Cette méthode donne de bonnes approximations du débit, parfois suffisantes pour les études envisagées.

Figure 3 : Jaugeage au flotteur

2.2 LE JAUGEAGE PAR EXPLORATION DU CHAMP DE VITESSE

Le jaugeage d'un cours d'eau consiste à mesurer la vitesse du courant. Cette vitesse varie latéralement d'une berge à l'autre et verticalement de la surface de l'eau au fond du lit.

C'est pourquoi pour chercher la vitesse moyenne du courant, il faut faire plusieurs mesures en différents points de la section mouillée.



2.2.1 Matériel de jaugeage

Le moulinet est un appareil de mesure de la vitesse d'un mouvement fluide. Il est composé d'une hélice qui détecte la vitesse du courant et transmet les indications à un compteur (figure.4).

Les moulinets sont montés sur des perches pour jauger les basses eaux ; et sont montés sur des saumons pour jauger les hautes eaux et les crues.

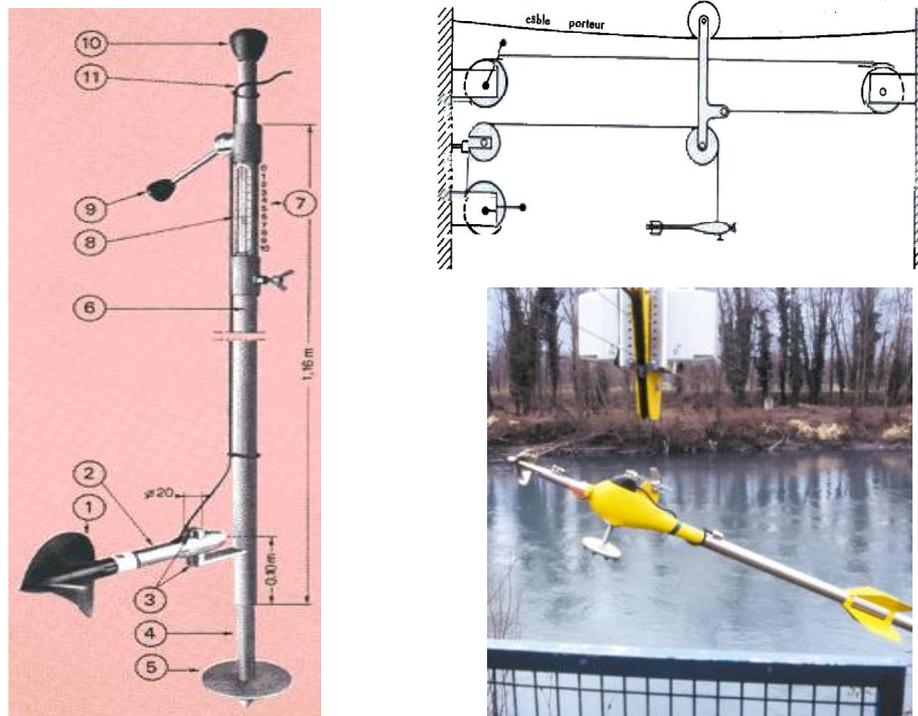


Figure 4 : Moulinet et moulinet sur saumon

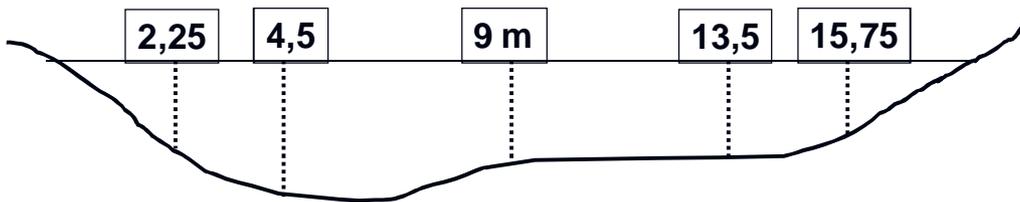
2.2.2 Dépouillement des jaugeages au moulinet et calcul des débits

2.2.2.1 Choix des positions des verticales de mesure :

Les verticales de mesure sont souvent choisies dans la largeur de la section mouillée de façon à condenser davantage les mesures vers les berges ; pour cela on adopte une méthode qui consiste à choisir tout d'abord le milieu de la section, puis les quarts, les huitièmes...etc. en direction des berges.

Le nombre des verticales à choisir dépendra de la largeur de la section (5, 7, 9...verticales).

Par exemple, pour une section transversale de 18 m de largeur, il y aura une verticale de mesure à 9 m de la berge, puis à 4,5 et 13,5 m, ensuite à 2,25 et 15,75 m.



Remarque : Il arrive de choisir des verticales équitablement espacées ; dans ce cas, pour la section de 18 m de largeur, les verticales seront à 3, 6, 9, 12 et 15 m de la première berge.

2.2.2.2 Profondeurs de mesure des vitesses du courant :

Selon la profondeur, on effectue généralement 3 à 5 mesures par verticale.

- Pour les jaugeages au micromoulinet (basses eaux), on commence à 3 cm au-dessus du fond, et on terminera au moins à 3 cm sous la surface de l'eau.

Pour choisir n points de mesure, on applique la règle : $(Pt - 6)/(n - 1)$

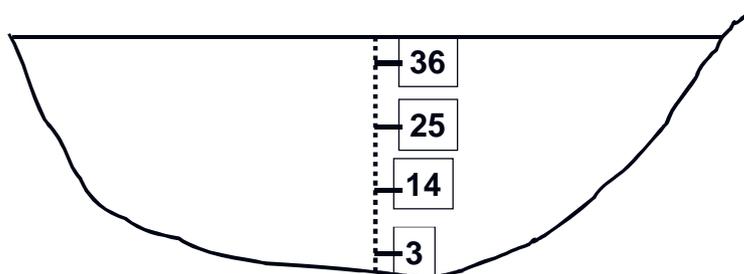
pt est la profondeur totale (ou hauteur d'eau)

Si la hauteur d'eau est de 40 cm et on veut effectuer 4 points de mesure par exemple :

$$40 - 6 = 34 \text{ et}$$

$$34 / 3 = 11,3 \text{ qu'on peut arrondir à } 11 ,$$

on choisira alors les points espacés de 11 cm, soit les hauteurs : 3, 14, 25 et 36 cm.



Pour choisir 5 points de mesure sur la verticale, on divise par 4 et on applique la même règle. On aura les hauteurs 3, 11, 20, 28 et 37 cm.

2.2.2.3 Exemple de jaugeage au micro-moulinet (Basses eaux)

On se propose de jauger sur une section large de 2 m (soit 200 cm). Les verticales de mesure seront positionnées à 25, 50, 100, 150 et 175 cm de la rive.

Les résultats du jaugeage sont sur le tableau suivant, sachant que la formule de l'hélice qui donne la vitesse du courant est :

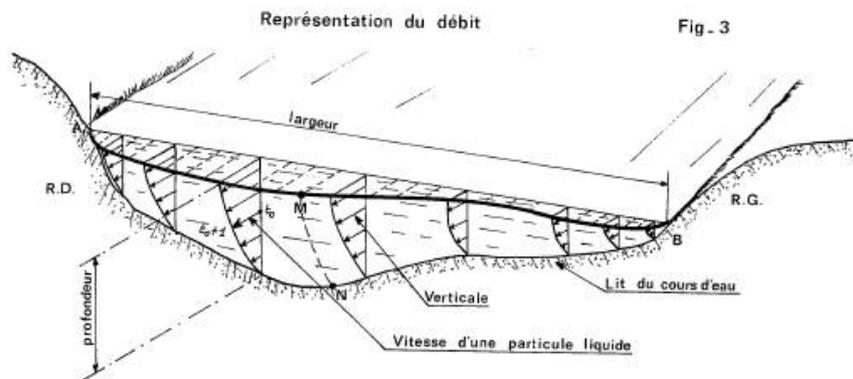
$$V = 0.056 n + 0,035 \text{ (n est le nombre de tour par seconde).}$$

Distance (cm)	Hauteur d'eau(cm)	Nombre de tops	Temps (s)	Vitesse (m/s)
0	0	0		
25	15			
-	3	57	30	0.141
-	6	64	30	0.154
-	9	87	30	0.197
-	12	96	30	0.214
50	18			
-	3	47	30	0.123
-	6	59	30	0.145
-	9	63	30	0.153
-	12	69	30	0.164
-	15	72	30	0.169

Distance (cm)	Hauteur d'eau(cm)	Nombre de tops	Temps (s)	Vitesse (m/s)
100	15			
-	3	93	30	0.209
-	6	109	30	0.238
-	9	112	30	0.244
-	12	99	30	0.220
150	15			
-	3	53	30	0.134
-	6	64	30	0.154
-	9	72	30	0.169
-	12	84	30	0.192
175	9			
-	3	37	30	0.104
-	6	42	30	0.113
200	0			

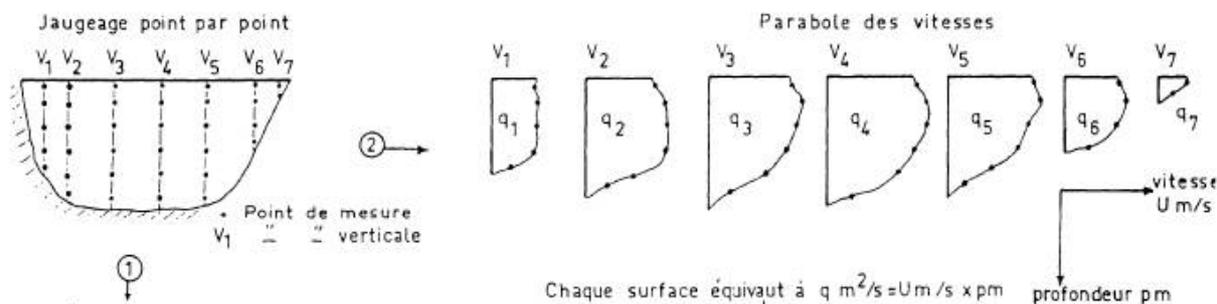
2.2.2.4 Exploration des champs des vitesses par la méthode des paraboles et calcul du débit :

On trace pour chaque verticale la courbe des vitesses en fonction de la profondeur (dite parabole des vitesses).



Remarque : La vitesse du fond est calculée à partir de la vitesse du 1er point de mesure à 3 cm au dessus de ce fond : $V_f = 0,8 * V$ à 3 cm de hauteur d'eau.

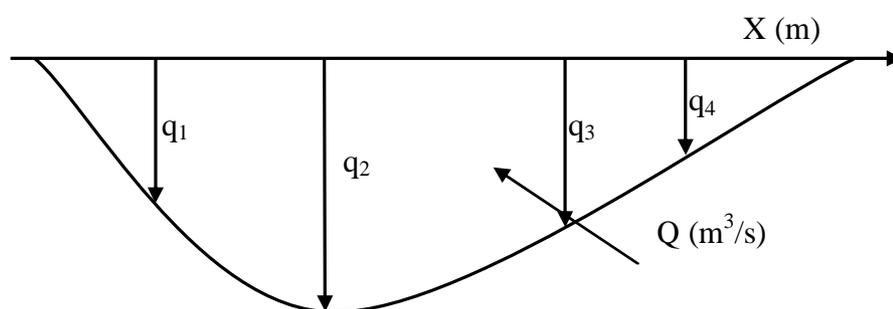
La vitesse à la surface du plan d'eau est légèrement inférieure ou égale à la vitesse au point qui est juste en dessous. Le planimétrage de chaque surface obtenue donne le débit par unité de largeur au droit de la verticale considérée.



On l'appelle débit unitaire (pu) et il est exprimé en m^2/s .

On trace ensuite la courbe de variation de ces débits unitaires suivant la largeur de la section.

Le planimétrage de l'aire délimitée par cette courbe donne le débit en m^3/s .



2.2.3 Le courantomètre électromagnétique

Dans le capteur de mesure immergé, une bobine d'induction crée un champ magnétique entre deux électrodes fixes; le déplacement de l'eau, fluide conducteur, dans ce champ magnétique, produit une tension induite proportionnelle à sa vitesse (principe de Faraday).

Cette tension induite est traitée par l'électronique du coffret de mesure afin de pouvoir être exploitée par l'opérateur.

La vitesse, affichée directement sur le compteur, correspond à une moyenne mesurée sur une durée variable fixée par l'opérateur (- 1 à 120 secondes pour le FloMate, 2 à 60 secondes pour le Sensa Ott) mais peut aussi être mesurée de façon instantanée.

La technique de mesure est celle du moulinet en point par point : choix du nombre de verticales, et nombre de points par verticale.



Figure 5 : Courantomètre électromagnétique

Le courantomètre permet de mesurer la vitesse de l'eau dans des conditions - faibles vitesses, zones à herbes peu favorables à l'utilisation du micro-moulinet.

2.2.3.1 Avantages

- La mesure des faibles vitesses est possible, en-dessous de 5 cm/s par exemple; il ne faut cependant pas s'illusionner sur la précision de la mesure des faibles vitesses, puisque l'introduction de l'appareil dans l'eau crée un courant de convection thermique qui serait de l'ordre de quelques mm/s.
- La mesure des vitesses en présence d'herbes est aisée, ce qui est un gros avantage sur le micro-moulinet; cela n'évite pas de poser le problème de la représentativité des points choisis. De même, en eaux chargées, le risque de détérioration est très réduit.
- Un même capteur mesure une gamme de vitesses plus large, mais néanmoins plafonnée.
- L'absence de pièces mobiles semble un avantage. Si en cas de choc, le courantomètre est peut-être un peu moins fragile que le micro-moulinet, il n'est pas à l'abri d'une détérioration.
- La lecture de la vitesse est directe.

2.2.3.2 Inconvénients

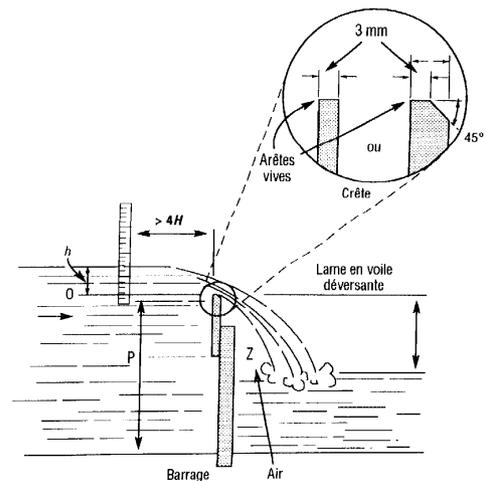
- La réparation en cas de problème sur le câble est difficile.
- La lourdeur du dispositif Ott, de l'ordre de plusieurs kg est un frein; le Flo-Mate ne pèse quant à lui que 1,65 kg en tout.
- La nécessité d'un nettoyage assez fréquent des électrodes et la réinitialisation à la remise en service en cas d'arrêt prolongé sont des contraintes.
- Un réétalonnage est conseillé tous les deux ans par Ott, tandis qu'il y a une procédure de remise à zéro avec le Flo-Mate
- La traînée est plus importante que celle du micro-moulinet, d'où quelques difficultés pour une bonne appréciation de la hauteur d'eau dans certains cas : faibles profondeurs , vitesses notables...

2.3 LA DETERMINATION DU DEBIT A L'AIDE D'OUVRAGES CALIBRES - DEVERSOIR

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.

❖ Éléments primaires de mesure:

- L = largeur du canal en amont;
- l = largeur du seuil déversant (crête);
- H = niveau maximal du liquide;
- h = dénivellation du liquide;
- P = pelle ou profondeur du déversoir
- X = distance entre l'extrémité de la crête et la paroi latérale.



2.3.1 Formes possibles:

- Rectangulaire (barrage total)
- Rectangulaire à contraction latérale
- Trapézoïdal ou de Cippoletti
- Triangulaire ou à gorge
- Linéaire (ou proportionnel)

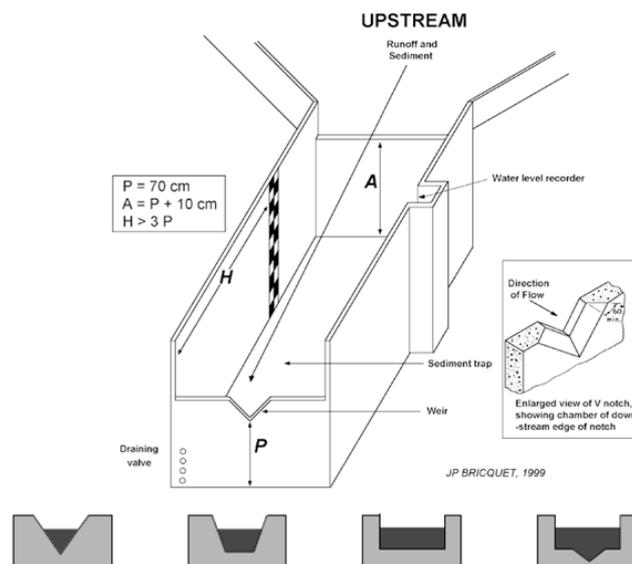


Figure 6 : Différents types de déversoir

2.3.2 Déversoirs triangulaires en mince paroi

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° $Q = C_e \frac{8}{15} \sqrt{2g} h_e^{\frac{5}{2}}$
- échancrure type 1/2 $Q = C_e \frac{4}{15} \sqrt{2g} h_e^{\frac{5}{2}}$
- échancrure type 1/4 $Q = C_e \frac{2}{15} \sqrt{2g} h_e^{\frac{5}{2}}$

Remarque $0.58 < C_e < 0.61$

En plus des conditions générales d'installation, les restrictions d'ordre pratique suivantes doivent être respectées :

- $0.05 \text{ m} < h < 0.40 \text{ m}$ h : charge
- $p > 0.45 \text{ m}$ p : pelle amont
- $B > 1.2 \text{ m}$ B : largeur du canal
- $h / B < 0.20$

2.3.3 Déversoirs rectangulaires en mince paroi

Le déversoir normalisé est composé d'une échancrure rectangulaire, symétrique dans une mince paroi verticale. Toute la paroi doit être lisse et unie, surtout sur la partie amont. Elle doit être perpendiculaire aux parois et au fond du canal.

Le déversoir est dit **avec contraction latérale** lorsqu'une échancrure est pratiquée dans la paroi mince ; le déversoir est dit **sans contraction latérale** lorsque la longueur de la lame déversante est égale à la largeur du canal (figure.7).

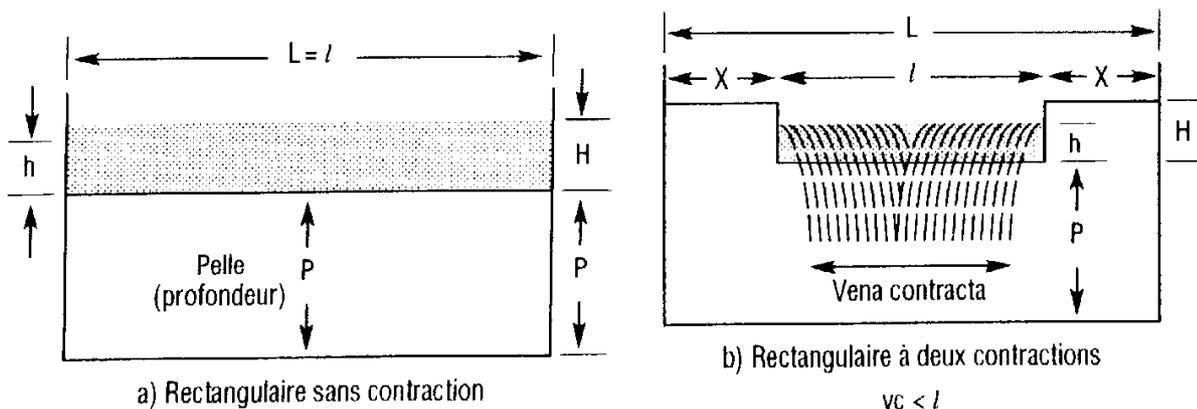


Figure 7 : Déversoir rectangulaire

La formule la plus générale du débit recommandée par l'Organisation Internationale de Normalisation pour un déversoir rectangulaire en mince paroi est la formule de Kindsvater-Carter :

$$Q = c_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} b_e h_e^{3/2}$$

où :

- Q est le débit (m³/s)
- C_e le coefficient de débit
- g l'accélération de la pesanteur (m/s²)
- b_e la largeur fictive de l'échancrure (m)
- h_e la charge piézométrique fictive ou hauteur de la surface liquide en amont par rapport au niveau de la crête (m)

2.3.4 Montage d'un déversoir

- ❖ Dimensionner pour que la vitesse d'approche du liquide soit de 0.2 à 0.5 m/s.
- ❖ L'espace Z doit être rempli d'air atmosphérique.
- ❖ Le niveau en aval doit être inférieur d'au moins 6 à 8 cm.
- ❖ La profondeur P de la pelle doit être supérieure à 3H. (Varie de 20 cm à 3m).
- ❖ La surlargeur latérale X ainsi que la largeur de la crête doit être supérieure à 3H.
- ❖ Le point de mesure du niveau doit être situé à au moins 4H en amont du déversoir, ou supérieure à 2(P+H). Le canal amont doit être droit sans turbulences sur une distance d'au moins 20H.

2.3.5 Choix du type de déversoir en mince paroi

Les déversoirs triangulaires sont utilisés de préférence aux déversoirs rectangulaires pour la mesure des faibles débits, car il est déconseillé d'utiliser des déversoirs rectangulaires de moins de 30 cm de largeur.

Pour les déversoirs rectangulaires, le choix de la largeur et de la pelle est fonction de :

- la gamme des débits à mesurer,
- de la hauteur disponible
- et de la précision souhaitée.

Il ne faut pas oublier que la lame d'eau mesurée doit être au plus égale à la hauteur de la pelle. Le tableau ci-dessous donne quelques limites raisonnables d'utilisation des divers déversoirs.

Gamme de débits à mesurer		Type de déversoir à utiliser	Lame d'eau correspondante		Observations
Mini	Maxi		Mini	Maxi	
0.2 l/s	35 l/s	triangulaire type ¼ $\text{tg } \alpha/2 = 1/4$	5 cm	40 cm	La pelle doit avoir si possible plus de 0.45 m, donc le canal doit avoir plus de 0.85 m de hauteur
0.4 l/s	70 l/s	triangulaire type 1/2 $\text{tg } \alpha/2 = 1/2$	5 cm	40 cm	
1 à 20 l/s	$70 > Q < 140$ l/s	triangulaire type 90° $\text{tg } \alpha/2 = 1$	5 cm pour 1 l/s	40 cm pour 140 l/s	
> 20 l/s	200 l/s	Rectangulaire de 0.30 m de largeur	10 cm	40 cm	pelle > 40 cm
50 l/s	500 l/s	Rectangulaire de 1 m de largeur	10 cm	40 cm	hauteur canal > 80 cm
100 l/s	1000 l/s	Rectangulaire de 1 à 2 m de largeur	15 à 10 cm	65 à 45 cm	hauteur canal > 1.30 m hauteur canal > 90 cm
500 l/s ¹	5 000 l/s	Rectangulaire de 5 à 10 m de largeur	15 à 10 cm	65 à 40 cm	hauteur canal > 1.30 m hauteur canal > 90 cm

2.3.6 Montage d'un déversoir

- ❖ Dimensionner pour que la vitesse d'approche du liquide soit de 0.2 à 0.5 m/s.
- ❖ L'espace Z doit être rempli d'air atmosphérique.
- ❖ Le niveau en aval doit être inférieur d'au moins 6 à 8 cm.
- ❖ La profondeur P de la pelle doit être supérieure à 3H. (Varie de 20 cm à 3m).
- ❖ La surlargeur latérale X ainsi que la largeur de la crête doit être supérieure à 3H.
- ❖ Le point de mesure du niveau doit être situé à au moins 4H en amont du déversoir, ou supérieure à 2(P+H). Le canal amont doit être droit sans turbulences sur une distance d'au moins 20H.

2.3.7 Autres dispositifs

Nous citerons :

- **Les seuils jaugeurs à ressaut** de type Hydrologic, fonctionnant dans une gamme de débits allant de 0.8 l/s à 152 l/s,

- **Les seuils métalliques**, ils s'installent dans des canaux en maçonnerie, de section rectangulaire et de pente faible. Le débit exprimé en l/s et par mètre de largeur varie de 7 l/s pour une largeur de 0.70 m et une pelle de 0.12 m à 1378 l/s pour une largeur de 1.45 m et une pelle de 0.48 m.

- **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.



Figure 8 : Canal de Venturi

2.4 LA MESURE DES HAUTEURS D'EAU

La mesure des hauteurs d'eau (**la limnimétrie**) ou de la variation d'un plan d'eau s'effectue généralement de manière discontinue par la lecture d'une règle graduée (**échelle limnimétrique**) fixée sur un support. Pour connaître en continu les variations d'un plan d'eau, on utilise des **limnigraphes** qui fournissent sur un support un enregistrement continu des variations du niveau d'eau dans la rivière en fonction du temps (enregistrement graphique sur bande papier, enregistrement magnétique sur cassette, etc.).

2.4.1 Section transversale

On appelle ainsi, en hydraulique, la section plane d'un cours d'eau, perpendiculaire à la direction de l'écoulement.

Les éléments géométriques de la section transversale sont tous définis en fonction du niveau de l'eau et varient donc avec lui. Le repère de niveau habituellement choisi est la profondeur maximale ; dans la section transversale qui contient l'échelle limnimétrique, appelée section de l'échelle, on utilisera toujours la hauteur lue sur l'échelle, encore appelée **cote limnimétrique**.

Ces éléments sont :

- **la section mouillée**, partie de la section transversale occupée par l'eau, dont la surface mouillée S (aire abc) est exprimée en m^2 ;
- **le périmètre mouillé p** , longueur de la ligne de contact entre la surface mouillée et le lit (exprimée en mètres) ;
- **le rayon hydraulique $R = S/p$** , quotient de la surface mouillée par le périmètre mouillé, homogène à une longueur exprimée en mètres ;
- **la largeur superficielle l** , mesurée à la surface (ligne AC) exprimée en mètres ;
- **la profondeur moyenne $h_m = S/l$** , quotient de la surface mouillée par la largeur superficielle exprimée en mètres.

Surface mouillée et rayon hydraulique sont d'une utilisation constante dans l'élaboration des courbes de tarage. Il est donc important de les calculer correctement.

Le profil en travers est utilisé pour la mesure de la largeur superficielle à différentes hauteurs choisies a priori.

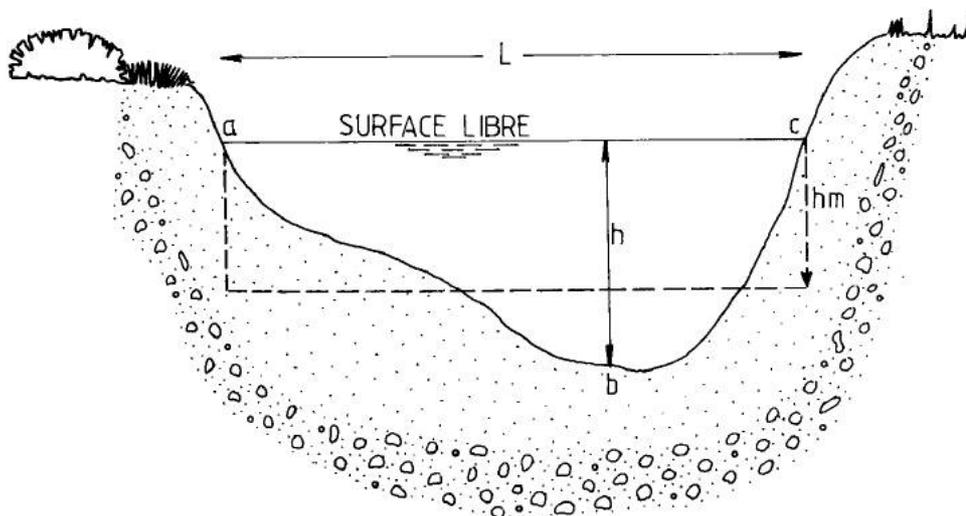


Figure 9 : *Éléments géométriques de la section transversale.*

2.4.2 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 (Fig) 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. Si l'échelle est inclinée, la graduation est corrigée en fonction de l'angle d'inclinaison avec la verticale.

La lecture de l'échelle limnimétrique se fait généralement au demi-centimètre près. Le zéro de l'échelle limnimétrique doit être placé au-dessous des plus basses eaux possibles dans les conditions de creusement maximum du lit dans la section de contrôle, et ce pour ne pas avoir de cotes négatives.

La fréquence des relevés de niveau est déterminée par le régime hydrologique du fleuve et par les objectifs visés par la collecte des données. Des lectures effectuées systématiquement deux fois par jour, complétées par des lectures plus rapprochées pendant les crues, suffisent, pour de nombreux cours d'eau, à fournir une information continue.



Figure 10 : Exemples d'échelle limnimétrique

2.4.2.1 Analyse de la répartition des points

Les courbes de tarage des stations hydrométriques se rapprochent de l'un des schémas théoriques représentés sur la figure. 11.

On distingue trois grandes catégories de tarages:

- les tarages univoques des stations à géométrie stable et à contrôle hydraulique permanent;
- les tarages non-univoques des stations situées dans des biefs à géométrie plus ou moins rapidement variable;

- les tarages non-univoques des stations situées dans des biefs à régime hydraulique non permanent.

L'analyse de la répartition des points sur le graphique de tarage permet d'associer la relation étudiée à l'un de ces schémas théoriques.

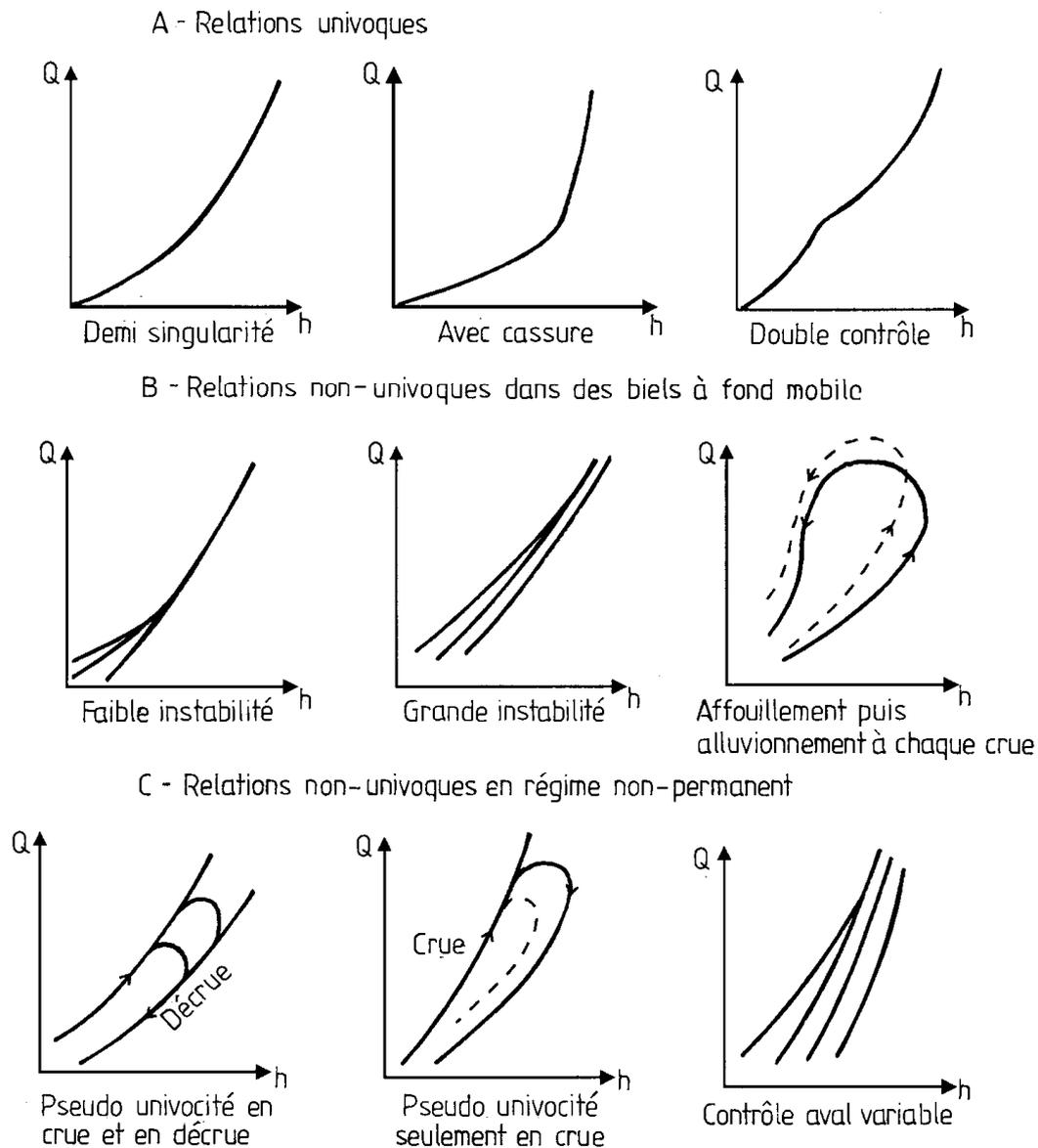


Figure 11 : Type de courbes de tarage (tiré de G. JACCON).

2.4.2.2 Tracé de la courbe de tarage

Le tracé de la courbe de tarage est fait sur un graphique à grande échelle, en coordonnées arithmétiques. Certains préfèrent utiliser un seul papier de grand format, d'autres plusieurs feuilles A4, d'autre des papiers spéciaux en échelles logarithmiques. Peu importe, si le tracé de la courbe est:

- *exact*, c'est à dire s'il respecte les conclusions de l'analyse effectuée antérieurement;
- *précis*, c'est à dire s'il permettra de lire les débits avec une marge d'erreur minimale.

Deux règles doivent être respectées lors du tracé de la courbe:

- *l'égalité répartition* des points, de part et d'autre de la courbe; cette règle est appliquée par tronçons successifs aussi limités que la densité des points le permet, de telle manière que toutes les irrégularités du tracé soient prises en compte (fig. 12);
- *la minimisation des écarts* à la courbe; les écarts sont pris dans le sens vertical, c'est à dire suivant les débits (rappelons que les hauteurs sont connues avec une précision très supérieure à celle des débits).

Le tracé est effectué par tronçons, en commençant par ceux où les points sont les plus nombreux. Il ne faut pas s'illusionner sur la précision d'un tracé basé sur quelques points isolés. Dans l'exemple de la figure 13 le tracé dans l'intervalle [200, 260] est beaucoup plus précis qu'à l'extérieur de cet intervalle.

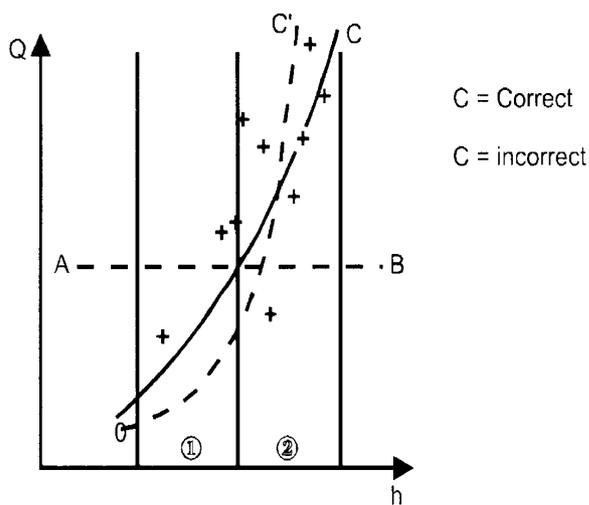


Figure 12 : Egale répartition du tracé.

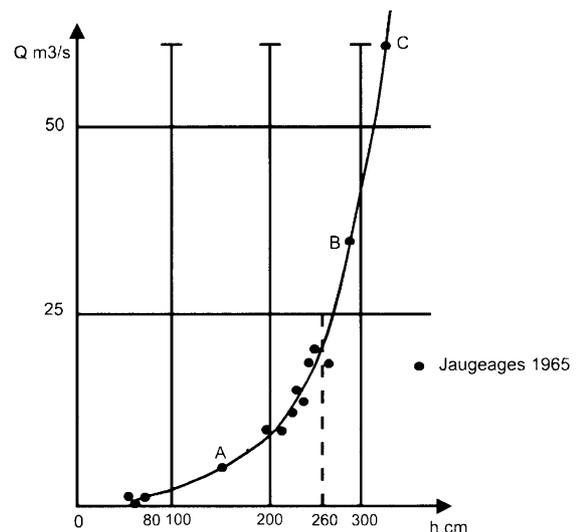


Figure 13 : Précision du tracé.

Dernière recommandation: le tracé doit être fait à main levée. L'utilisation de tout instrument de dessin, de type *perroquet*, est exclue: une courbe de tarage n'est pas une parabole ou une exponentielle, du moins dans sa totalité. En dehors du fait que ces instruments masquent les petites anomalies du tracé, ils conduisent souvent à des interpolations ou extrapolations injustifiées.

2.4.2.3 Extrapolation de la courbe de tarage

La relation Q/h doit être définie dans la totalité de l'intervalle de variation des hauteurs d'une chronique limnimétrique homogène. Cet intervalle, limité par les hauteurs minimale et maximale lues sur l'échelle, est désigné par intervalle de définition du tarage.

En général, le nombre de jaugeages est insuffisant, ou bien la répartition est mauvaise, et la courbe de tarage est incomplète: elle doit donc être extrapolée à ses extrémités.

Les méthodes d'extrapolation diffèrent suivant que le tracé de la courbe doit être prolongé *vers le haut* (moyennes et hautes eaux) ou *vers le bas* (basses eaux).

L'extrapolation vers le haut, qui implique une bonne connaissance du fonctionnement hydraulique de la station en très hautes eaux, peut conduire à modifier le tracé de la courbe: il est recommandé de la faire avant l'extrapolation vers le bas.

2.4.3 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 solide 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.

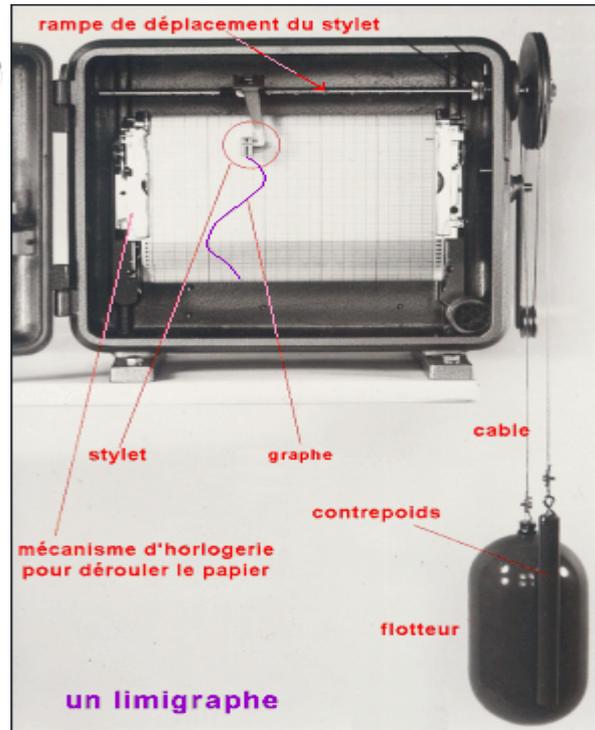
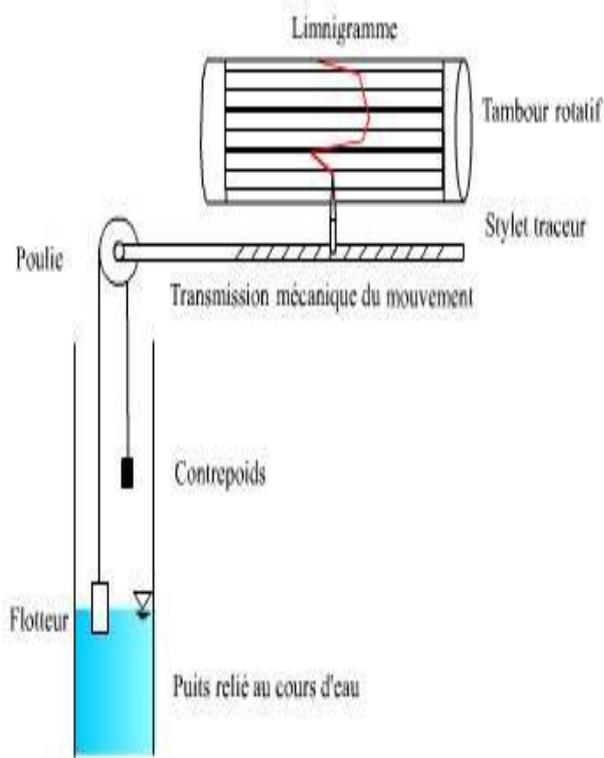
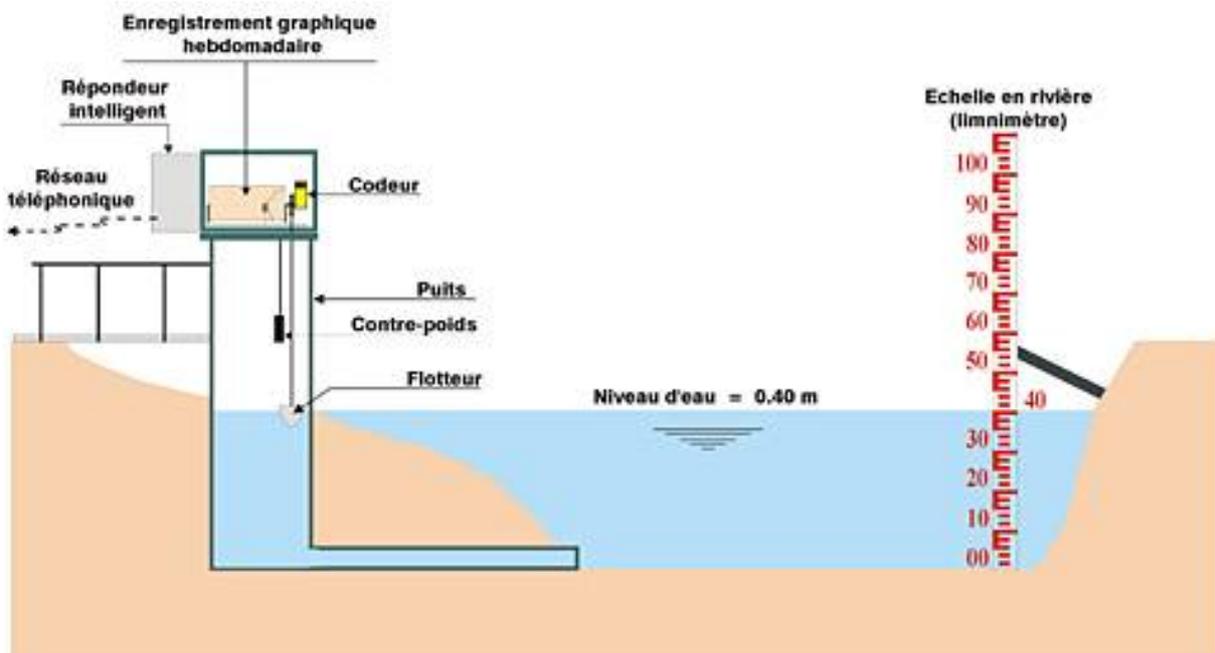


Figure 14 : Schéma du limnigraphe à flotteur

Figure 15 : Exemple de limnigraphe



2.5 LES JAUGEAGES PAR DILUTION (METHODE CHIMIQUE)

2.5.1 Principe

La méthode de traçage permet de calculer le débit d'un écoulement indépendamment des mesures de hauteur et de vitesse. Le débit ainsi calculé peut permettre de vérifier un débitmètre en place ou une mesure de vitesse d'écoulement. Le principe du traçage par injection instantanée consiste à effectuer un bilan de masse : la masse de traceur injectée en amont d'un tronçon sur lequel on veut mesurer un débit Q doit être égale à la masse de traceur déterminée en aval, en mesurant la concentration $C(t)$ en traceur, après dilution dans l'écoulement et propagation dans le tronçon.

Cette méthode de jaugeage par dilution 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 jaugeages au moulinet.

2.5.2 Critères de choix

En hydrologie urbaine, les traceurs chimiques ou colorés sont les plus utilisés. Un traceur doit satisfaire les critères suivants :

- ne pas être naturellement présent dans l'écoulement (ou présent en faible et constante quantité : il faut donc déterminer le bruit de fond) ;
- se mélanger facilement à l'eau ;
- être stable durant la durée du traçage (la teneur en sel varie en temps de pluie) ;
- être mesurable par un capteur en temps réel (moins onéreux que les analyses avec prélèvements et surtout visualisation sur site des résultats) ;
- être d'un coût aussi faible que possible pour pouvoir être utilisé en grande quantité.

Tableau 1: comparaison des traceurs (source Bertrand-Krajewski et al., 2000)

	Rhodamine WT	Chlorure de lithium	Chlorure de sodium
		LiCl	NaCl
Concentration usuelle des solutions mères	200 g/L	300 g/L	300 g/L
Concentration usuelle dans l'effluent (bruit de fond)	10-3 mg/L (-)	2 à 5 mg/L (1 à 5 µg/L)	50 mg/L (50 à 1000 mg/l)
Techniques de mesurages possibles (coût / précision)	Fluorimétrie en continu (moyen / grande)	Spectrométrie sur prélèvements (fort / moyenne)	Conductimétrie en continu (faible / moyenne)
Précautions	- adsorption sur MES - influence de la T° et des MES	- adsorption sur MES - attaque acide avant dosage	- linéarité jusqu'à 5,8 g/L - influence de la T° - bruit de fond

En tenant compte de tous les critères, deux traceurs apparaissent comme les plus appropriés :

- le chlorure de sodium NaCl pour le temps sec,

- la Rhodamine WT pour le temps de pluie, avec des mesures à un pas de temps fin de l'ordre de la seconde. Un traçage avec des échantillons prélevés à des pas de temps plus longs (30 secondes) est moins précis.

2.5.3 Méthodes de traçage et types d'injection

La méthode par dilution consiste à injecter en une seule fois (**injection instantanée**) ou en continu (**à débit constant**) une solution de traceur à l'amont, et à mesurer en un point à l'aval les variations de concentration du traceur au cours du temps.

Méthode de traçage	Avantages	Inconvénients
Méthode de dilution avec injection instantanée du traceur	<ul style="list-style-type: none"> • peu de matériel nécessaire • rapide et peu coûteuse • personnel réduit - quantité de traceur plus faible 	<ul style="list-style-type: none"> • nécessité d'avoir un débit mesuré Q constant pendant l'opération (temps sec) • difficulté pour déterminer avec exactitude le début et la fin du passage du traceur - débit et vitesse doivent pouvoir être évalués • nécessité d'avoir un débit mesuré Q constant pendant l'opération (temps sec) • besoins importants en matériel et traceur • nécessité d'avoir plusieurs opérateurs
Méthode de dilution avec injection à débit constant du traceur	ne nécessite aucune connaissance préalable de la section mouillée - détermination facile du début et de la fin du passage du traceur	

2.5.4 Précautions

Le tronçon de mesure doit répondre aux critères suivants :

2.5.4.1 Bruit de fond

Si le traceur est présent dans l'écoulement à la concentration supposée constante pendant la durée des mesures, il faut soustraire ce bruit de fond à la concentration mesurée. La moyenne des concentrations mesurées du traceur pendant plusieurs minutes, en enlevant les valeurs aberrantes, avant et après le traçage, permet d'estimer le bruit de fond. Il faut que le pic de concentration du traçage soit au moins 3 fois supérieur au bruit de fond, dans la limite de la gamme de mesure de l'appareil (fluorimètre, conductimètre, ...).

2.5.4.2 Distance de bon mélange

La distance de bon mélange est atteinte lorsque la concentration de traceur est homogène à travers toute la section de mesure. La distance entre le point d'injection et le point de mesure du traceur doit être supérieure à celle du bon mélange.

2.5.5 Méthode de mesure

2.5.5.1 Injection du traceur en solution à débit constant pendant un temps déterminé

Durée de l'injection de telle sorte que la concentration du traceur dans la rivière reste constante

$$q \cdot C_1 = (Q + q) \cdot C_2$$

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

Q : débit du cours d'eau [l/s] ;

q : débit de la solution mère

C_1 : concentration de la solution mère [g/l] ;

C_2 : concentration du traceur à la section de prélèvement [g/l] ;

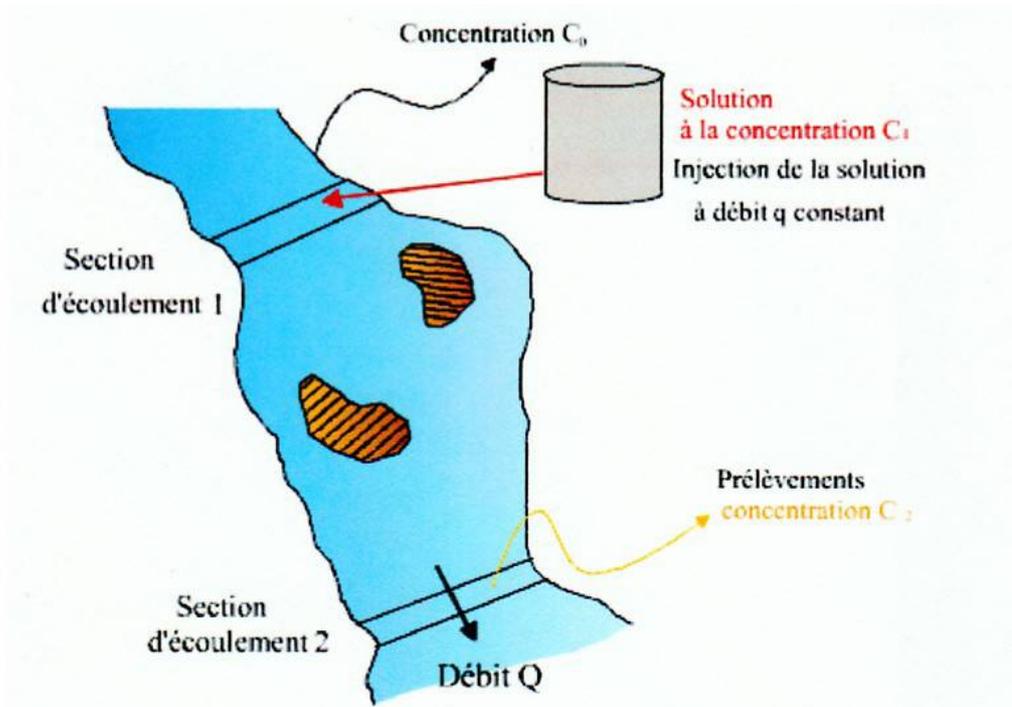


Figure 16 : Principe du jaugeage par dilution ; mode opératoire.

2.5.5.2 Injection instantanée du traceur en solution dans la rivière

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 \bar{C}_2 qui évolue en fonction du temps et du point de prélèvement.

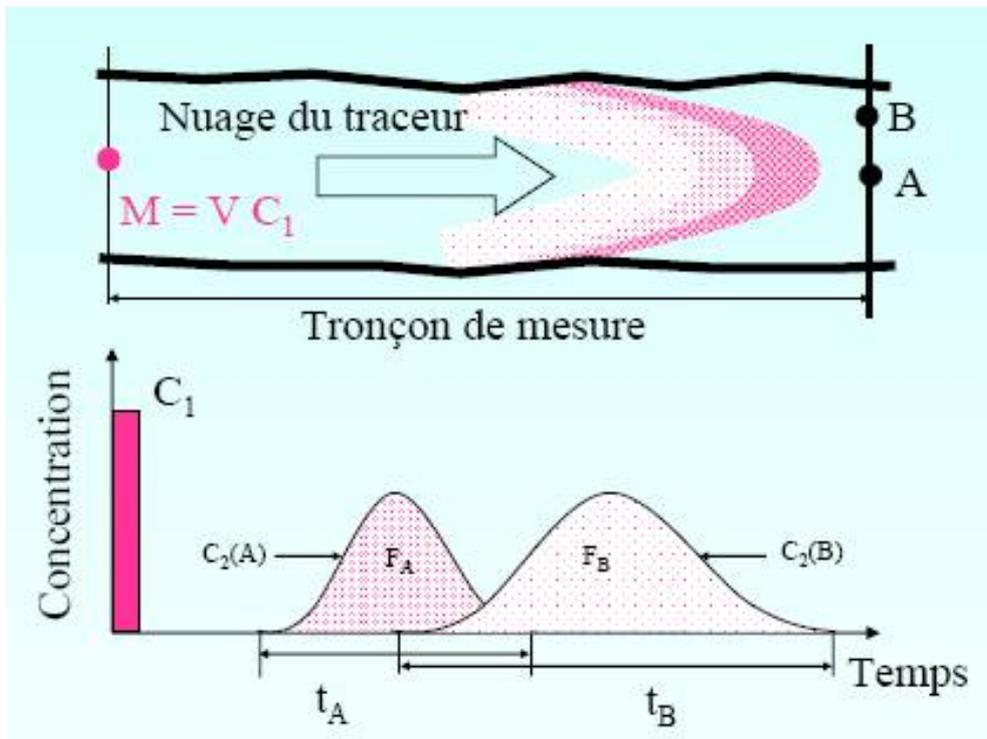
$$M_1 = M_2$$

$$V_1 C_1 = V_2 \bar{C}_2$$

$$V_1 C_1 = Q \cdot T \cdot \bar{C}_2$$

$$Q = \frac{V \cdot C_1}{T \cdot \bar{C}_2}$$

- M₁ : masse du traceur dans la solution
- M₂ : masse du traceur dans la rivière
- V₁ : volume de la solution
- V₂ : volume d'eau transité dans la rivière
- C₁ : concentration du traceur dans la solution
- C₂ : concentration moy. du traceur dans la rivière
- Q : débit de la rivière
- T : durée totale des prélèvements



3 LES CAPTEURS DE PRESSION

Principe : mesure de la pression hydrostatique de la colonne d'eau

- Déformation d'une membrane souple sous l'effet de la pression hydrostatique
- Transformation de la déformation mécanique en signal électrique par un transducteur
- Transducteur les plus utilisés : jauges de contraintes métallique ou céramique

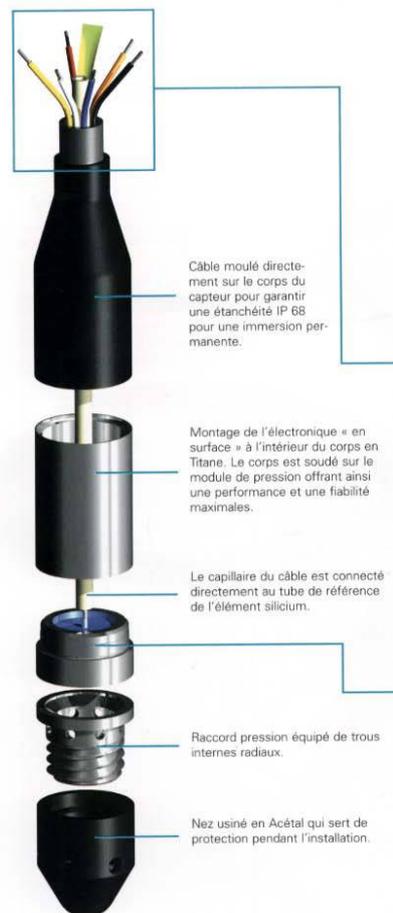
Précision : de 0.5 mm à 1 cm suivant la gamme de mesure

Avantages :

- Installation simple
- Grande précision

Inconvénients :

- Dérive liée à la déformation de la membrane (Nécessité de recalibrer périodiquement la sonde)
- Envasement
- Mise à l'air libre prolongé (étiage) peut endommager la sonde



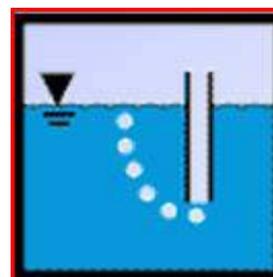
4 LES CAPTEURS DE PRESSION BULLE A BULLE

• Principe :

- Compresseur envoie un débit d'air dans un tube immergé
- La pression correspondant à l'apparition des 1ères bulles est proportionnelle à la hauteur d'eau
- Elle est mesurée par un capteur de pression différentielle

• Avantages :

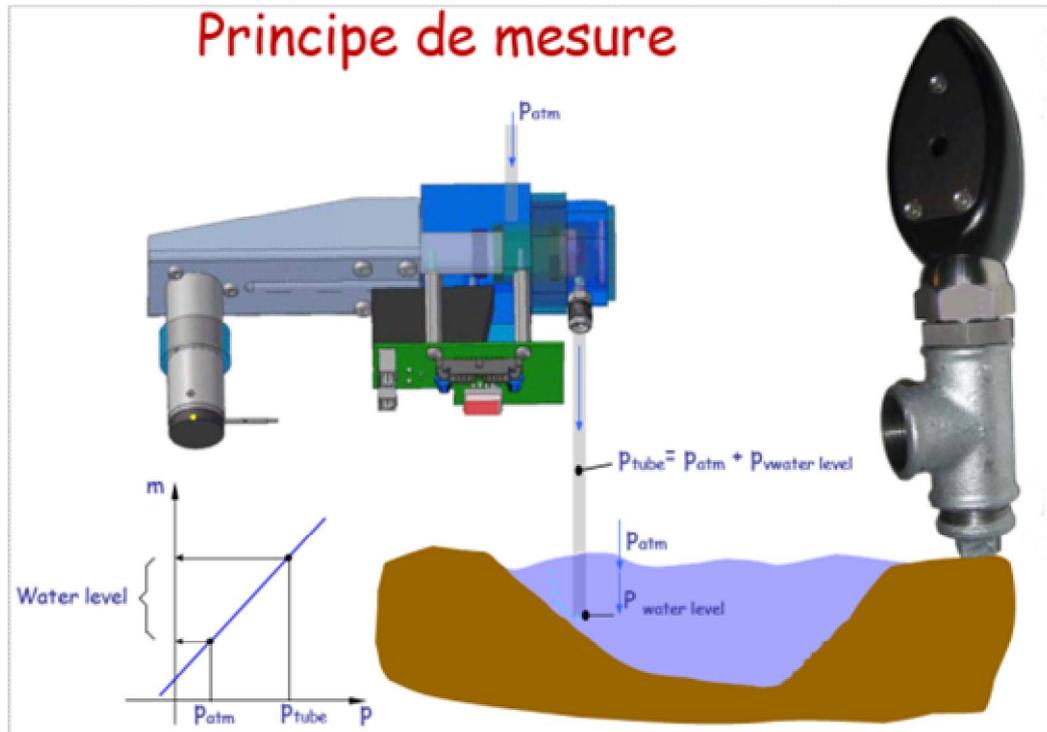
- Installation simple
- Bonne sensibilité (1 cm pour 10 m)
- Installation simple et peu coûteuse



- Uniquement un tuyau en plastique dans l'eau (peu de perte en cas de crue ou de vandalisme)

• **Inconvénients :**

- Difficulté de mesure dans les écoulements turbulents
- Atténuation du signal pneumatique



5 CAPTEURS A ULTRA-SONS

• **Principe :**

- Mesure du temps de parcours aller-retour d'une onde ultrasonore
- La hauteur (h) du plan est déduite du temps de propagation l'onde vers le plan d'eau :

$$h = c \cdot T / 2$$

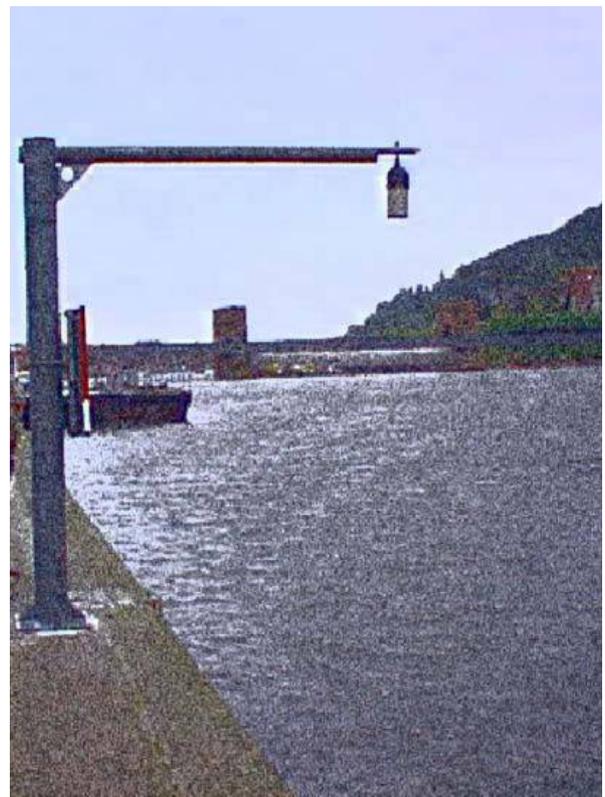
• **2 types :**

- capteurs immergés
- capteurs aériens

• **Avantages :**

Mesure des écoulements chargés (ultra-son aérien) ou bien mesure sans contact.

• **Inconvénients :**



facteurs d'influence difficile à prendre en compte : T°, salinité, vent, ...(nécessité de lisser et de caler périodiquement les valeurs)

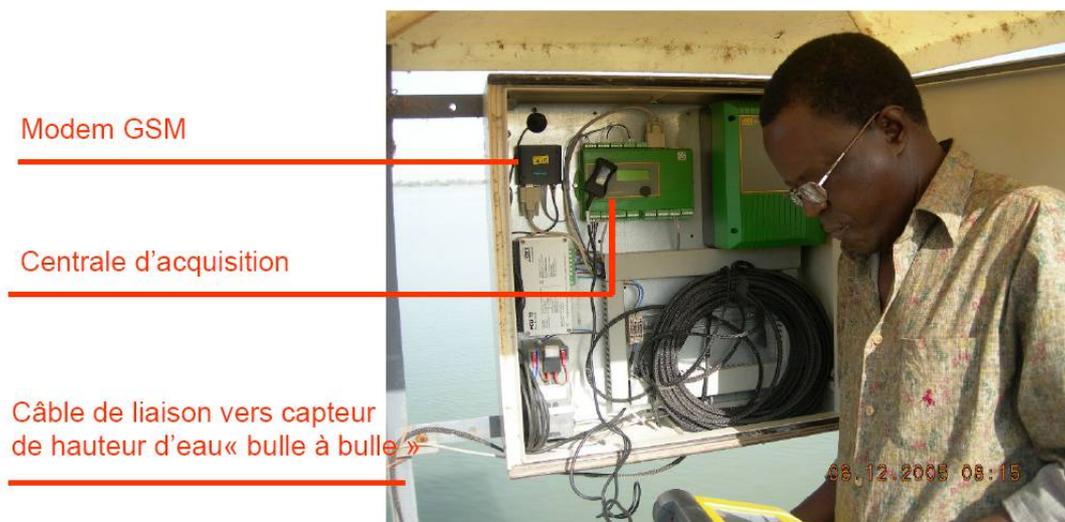
6 L'ACQUISITION ET L'ENREGISTREMENT DES DONNEES

Centrales d'acquisition :

- Mémoire de stockage des données
- Paramétrage du mode d'acquisition des capteurs :
 - En fonction du temps : acquisition à pas constant
 - En fonction de la variation de hauteur d'eau



- Nombre de voies (nbre de capteurs)
- Mémoire : jusqu'à plusieurs Mo (plusieurs mois d'autonomie)
- Indépendante ou intégrée au capteur



Station hydrologique avec télé-transmission GSM

7 BIBLIOGRAPHIE

- 1) Bertrand-Krajewski J.-L., Laplace D., Joannis C., Chebbo G. (2000). Mesures en hydrologie urbaine et assainissement. Paris (France) : éditions Tec&Doc, 808 p., ISBN : 2-7430-0380-4. Partie 4 : Mesurage des flux polluants - Chapitre 13 : Mesurage du débit par traçage
- 2) **Conception et optimisation des réseaux hydrométriques (Mars 2007) : IRD - Unité OBHI (Observatoires Hydrologiques et Ingénierie)** http://whycos.org/whycos/sites/default/files/public/pdf/training-material/reseau_hydro.pdf.
- 3) Projet Volta – HYCOS Stage Formation "Techniques hydrométriques". Installation d'une station hydrométrique. Connaissance du terrain – aspects théoriques. http://www.whycos.org/fck_editor/upload/File/Volta-pdfs/Notes_hydro_terrain.pdf
- 4)