



ASPECT METROLOGIQUE GRANDEURS UTILES EN HYDROLOGIE

Dr Christophe Joerin

Office fédéral des eaux et de la géologie

3003 Bern

christophe.joerin@bwg.ch

1 Introduction

❑ Objectifs

- Aperçu des différentes techniques de mesures utilisées en hydrologie
- Identifier l'origine des données
- Fournir une références pour l'éventuelle instrumentation d'un bassin versant

❑ Approche

- Présentation théorique
- Illustration pas des cas réels
 - Réseau de l'OFEG
 - Expériences personnelles
- Exercice
- Références
 - Bibliographie
 - Normes
 - <http://www.pleinair.ch/joerin/profession.html> **#Teaching**

2 Réseaux d'observations

2.1 Utilité et besoins d'un réseau d'observations

- Gestion des ressources en eau
 - Etat des réserves (glaciers, lacs, glaciers)
 - Eau potable
- Economie - agriculture
 - Energie hydroélectrique
 - Irrigation
 - Eau de refroidissement
- Recherche
 - Modélisation hydrologique
 - Etudes des processus
 - Transformation de la pluie en débit
 - Evaluation des effets des changements climatiques
 - Analyse statistique des précipitations et des crues

2.1 Utilité et besoins d'un réseau d'observation

- Protection de l'environnement
 - Débits minimaux
 - Cycle naturel de l'eau
 - Renaturation
- Evaluation et protection contre les dangers
 - Prévion et prédiction des crues
 - Système d'alarme
 - Dimensionnement d'aménagement de protection
 - Bassins de rétention
 - Dignes
 - Etablissement des cartes de dangers
 - Aménagement du territoire
 - Erosion
- Planification et dimensionnement des aménagements
 - Ponts, digues, contournements ...
 - Réseau d'eaux usées
 - STEP



3 Le bilan hydrique

- On peut schématiser le phénomène continu du cycle de l'eau en trois phases:
 - les précipitations
 - le ruissellement de surface et l'écoulement souterrain
 - l'évaporation

$$\frac{dS}{dt} = I - O = P - Q - ET$$

Avec :

P : précipitations (liquide et solide) [mm],

S : ressources (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm],

Q : ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm],

ET : évapotranspiration [mm],

I : Input [mm],

O: Output [mm]

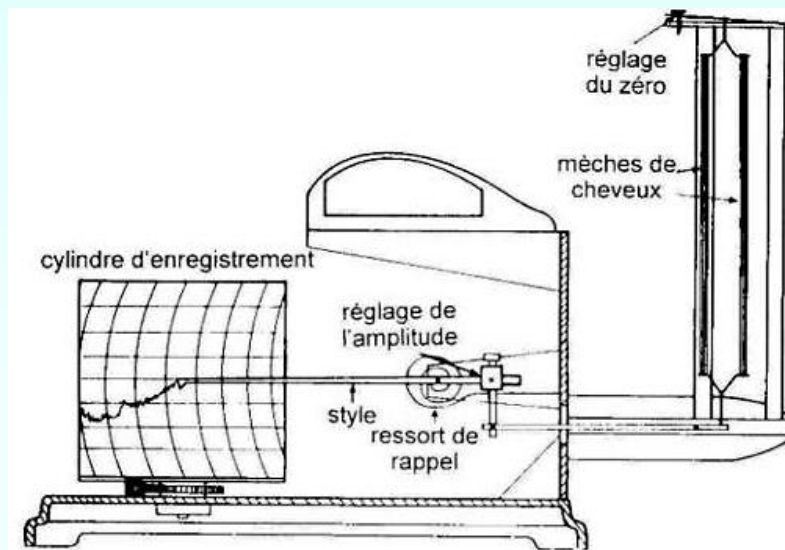
4 Evapotranspiration

- ❑ Composante difficile à estimer
- ❑ Evaporation
 - Passage par des formules empiriques (ex: Formule de Penman) faisant intervenir:
 - la température de l'air,
 - l'humidité de l'air,
 - le rayonnement solaire,
 - la vitesse du vent.

4.1 Mesures climatologiques (1)

□ Station météo

- Température
 - Thermomètre
- Humidité de l'air
 - Hygromètres à capteur organique
 - Mèche de cheveux
 - Variation de la longueur avec l'humidité



représentation schématique d'un hygromètre à cheveux

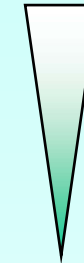
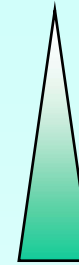


4.1 Mesures climatologiques (2)

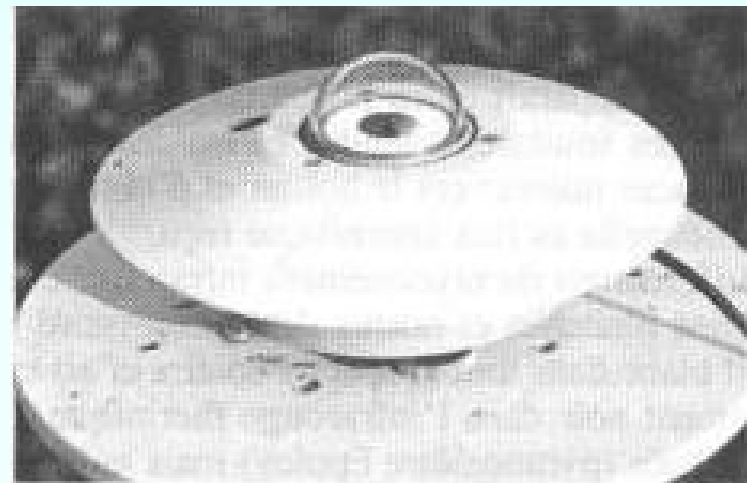
- Humidité de l'air
 - Hygromètres capacitifs
 - Hygromètres à condensation

Précision

Coût



- Mesure du rayonnement solaire
 - Pyranomètre
 - Mesure l'écart thermique entre une surface réceptrice noire et le boîtier



4.1 Mesures climatologiques (3)

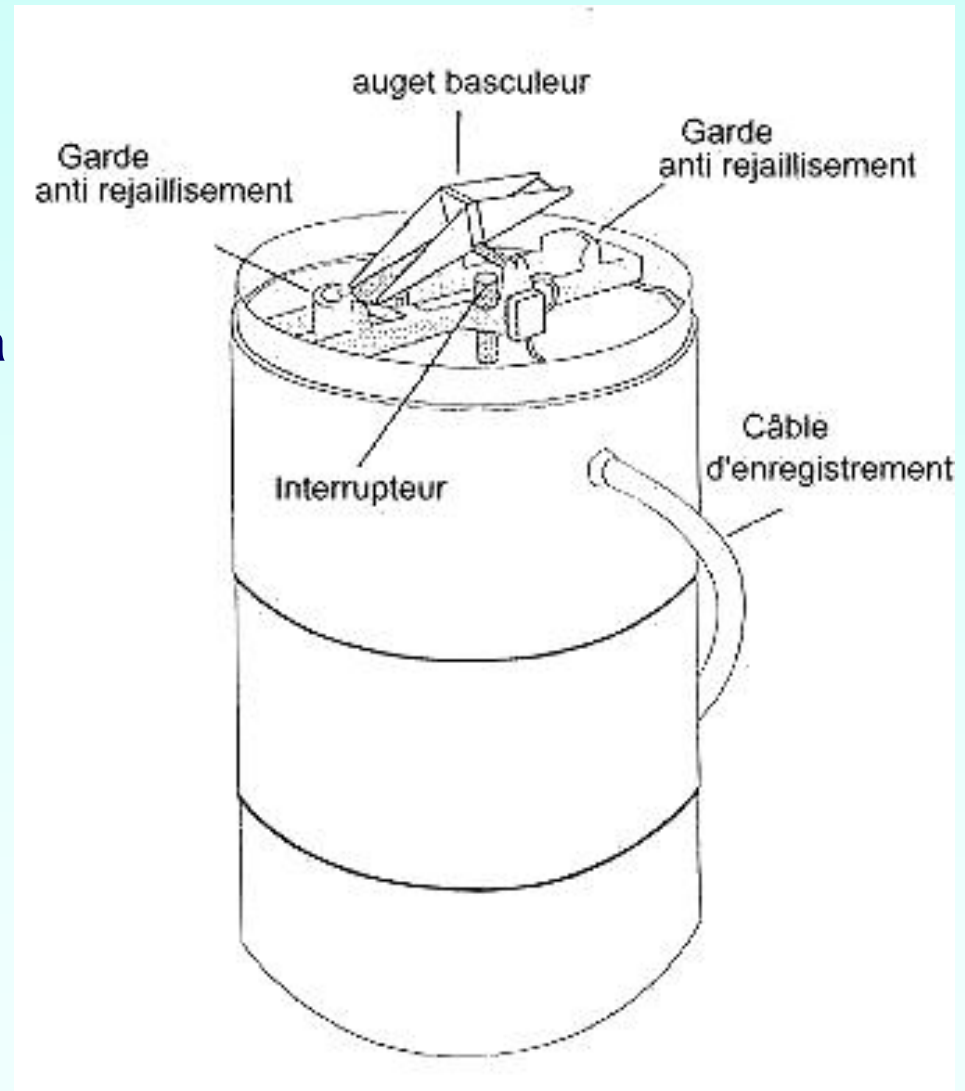
- ❑ Mesure de la pression
 - Baromètre
- ❑ Mesure de la vitesse du vent
 - Direction : girouette
 - Vitesse : anémomètre à hélice



4.2 Mesures des précipitations (1)

□ Pluie totale

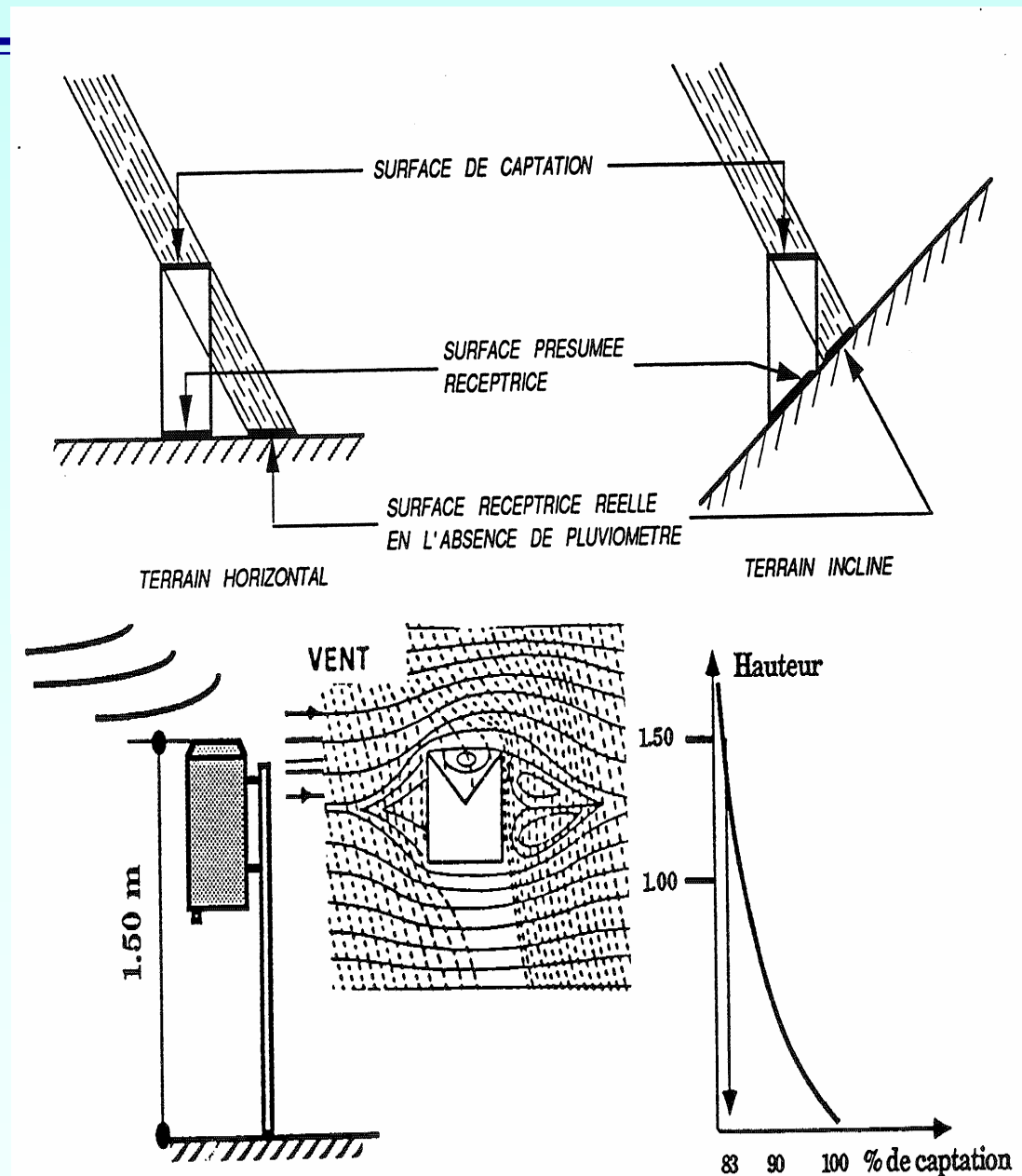
- Pluviomètre totalisateur
- Pluviographe enregistreur à auget basculeur
 - Basculement entraîne un petit aimant qui passe en face d'un interrupteur et ferme un contact



4.2 Mesures des précipitations (2)

❑ Erreur de captation

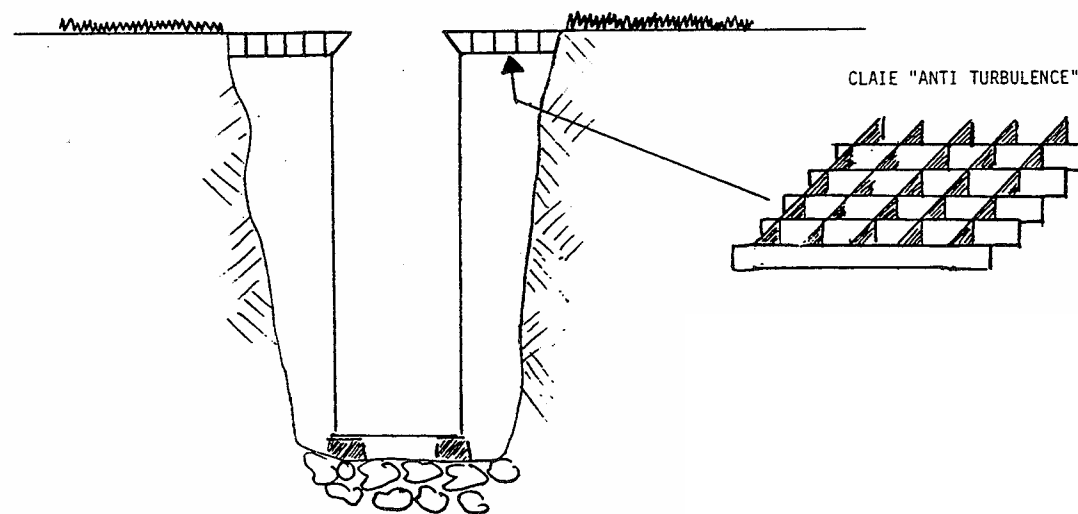
- Angle entre la pluie et le pluviographe
- Turbulences dues aux instruments de mesure
 - Absence d'obstacles



4.2 Mesures des précipitations (3)

□ Pluviomètre enterré

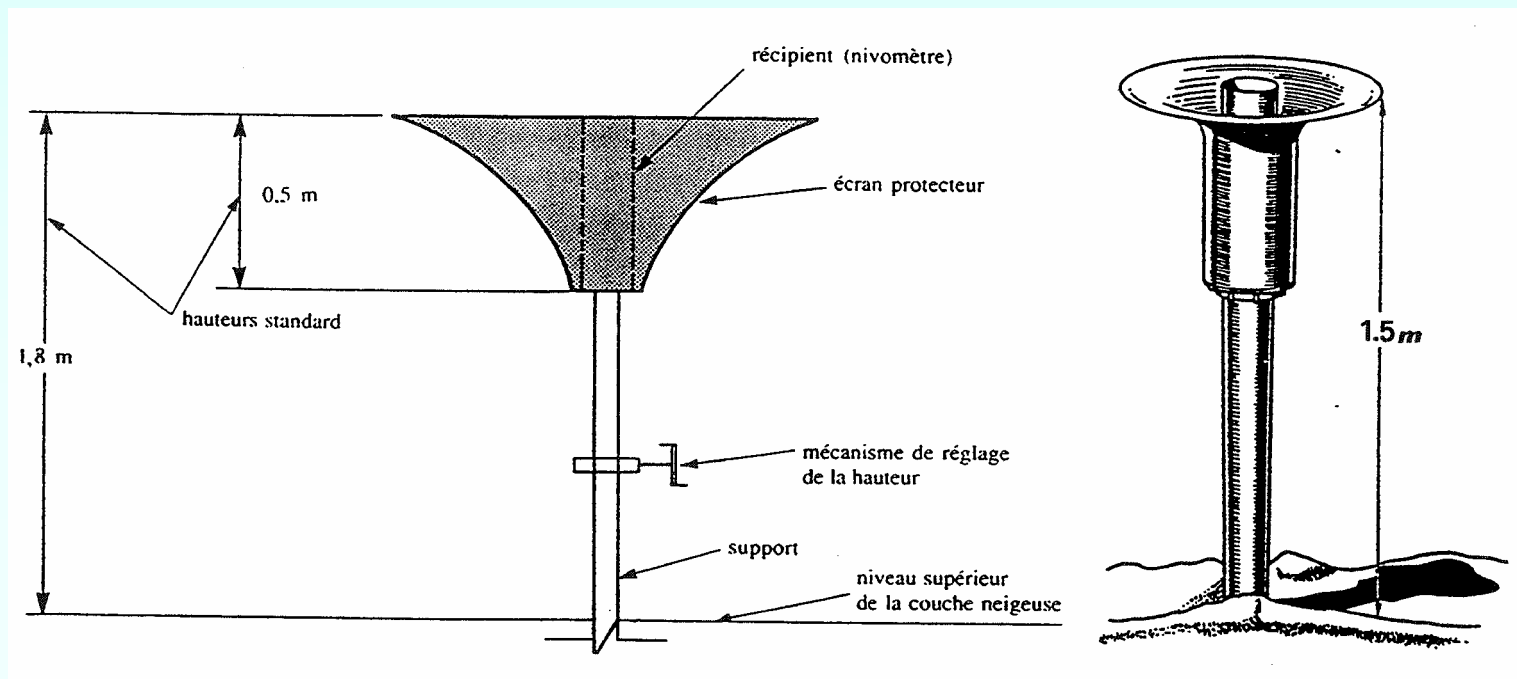
- Captation de l'eau arrivant effectivement au sol
- Inconvénients
 - Coût
 - Risque de submersion



4.2 Mesures des précipitations (4)

❑ Mesure de la neige

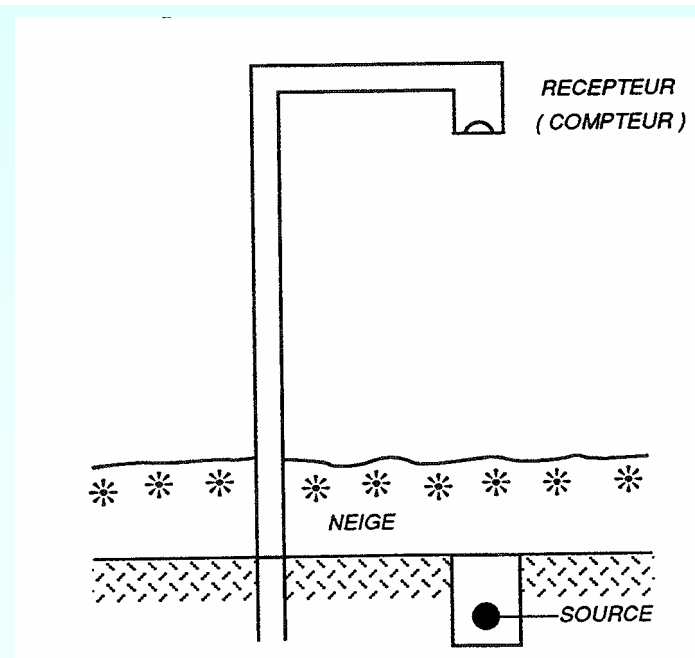
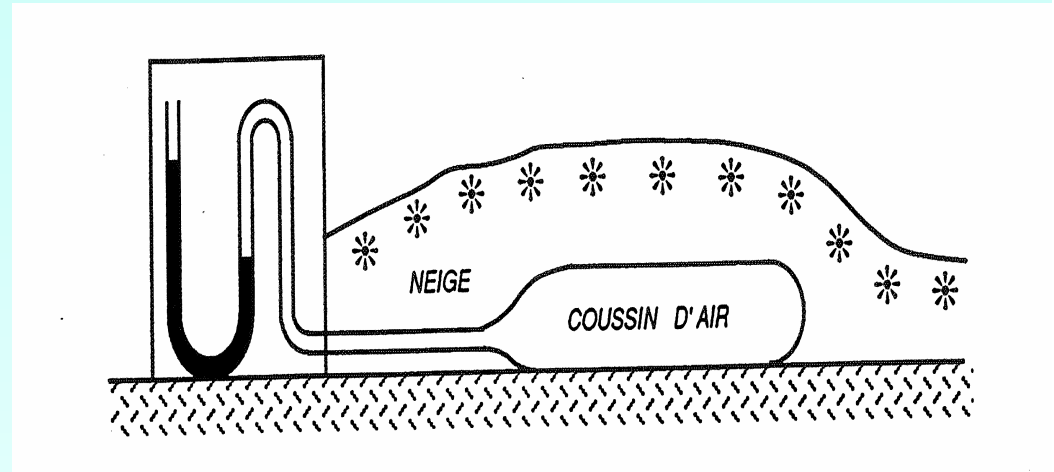
- Croix à neige
 - Diminution des turbulences
 - Chauffage
 - Equivalent en eau
 - Mesure inadéquate



4.2 Mesures des précipitations (5)

□ Mesure de la hauteur de la neige

- Densité de la neige
 - Equivalent d'eau
- Mesure manométrique
 - Poids de la neige
- Mesure neutronique
 - Radio-isotopes
 - Rayon gamma émis par une source radio-active
 - Atténuation en fonction de l'équivalent en eau de la couche neigeuse



4.3 Mesures de l'interception

❑ Interception

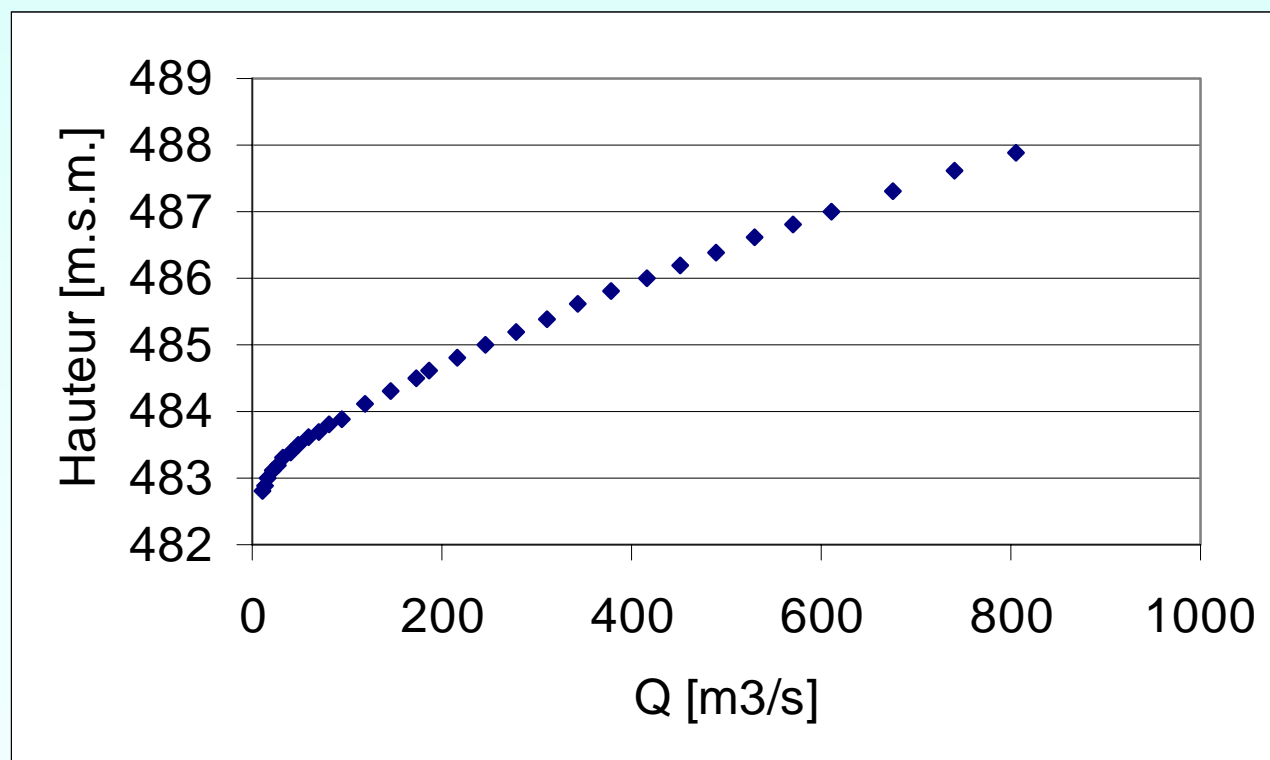
- Eau qui reste bloquée dans le feuillage et repart par évaporation directe, sans entrer dans le cycle d'eau du bassin versant.
- Estimation: différence entre les valeurs de précipitation obtenues à l'air libre et celles obtenues sous couvert

❑ $\text{Pluie brute} = \text{Pluie totale} - \text{Interception}$



5 Courbe de tarage (1)

- Le débit ne peut pas être mesuré directement
 - Transformation des hauteurs d'eau en débit
 - Construction d'une courbe de tarage
 - Sur la base des jaugeages de la rivière
 - 6 points au minimum selon la norme ISO 1100, 1973



5 Courbe de tarage (2)

□ Construction

● Principe

- Faire passer une droite à travers le nuage de points de telle sorte qu'ils soient répartis de façon équitable de part et d'autre de la courbe

● Méthodes

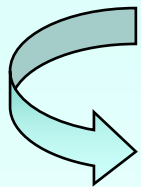
- Graphique
 - Tracés au pistolet
- Mathématique
 - Ajustement d'une fonction théorique
 - Minimisation des écarts entre les points observés et la courbe
 - Méthode des moindres carrés

6 Mesures des niveaux des eaux

6.1 Type d'échelle limnimétrique

- Echelles verticales

- Matériaux: tôle d'acier, fonte, plastique
- Longueur : 20 - 100 cm, plaque tous les mètres ou 50 cm
- Relever dans toutes les circonstances (crues, étiages)



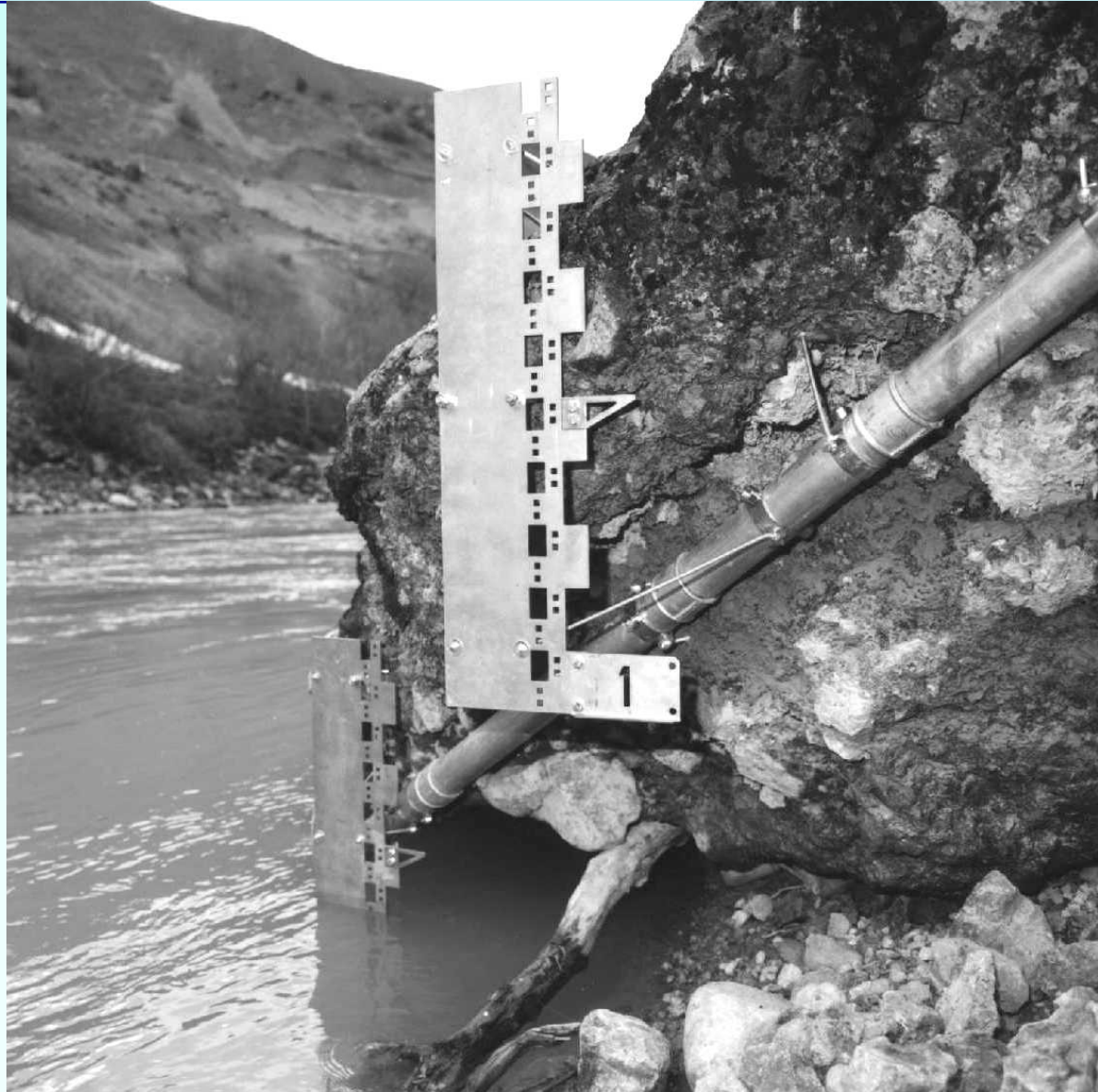
- Echelles en gradin

- Plusieurs lattes couvrant toute la gamme des niveaux
 - Ex: L'amplitude maximale des variations du niveau du lac des Brenets dans le Jura est de 20.2 m. Huit échelles ont dû être installées.



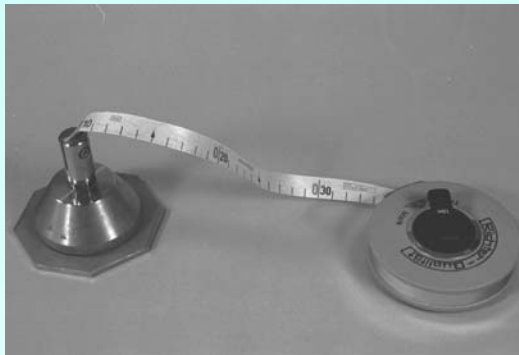
6.1 Echelles limnimétrique

- Echelle en gradin

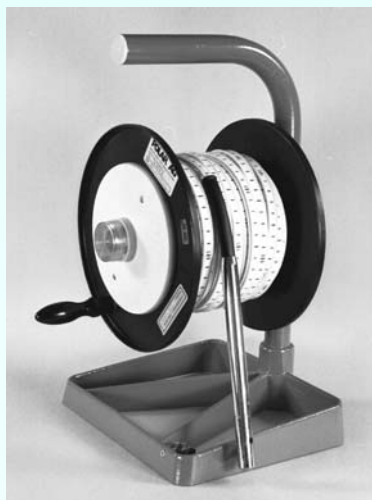


6.2 Limnimètres à mesures inverses

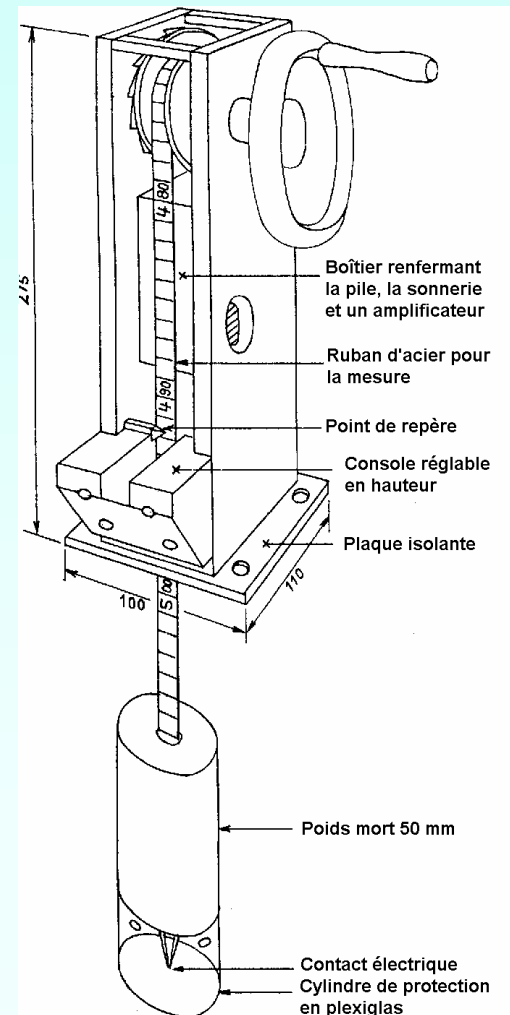
- ❑ Inverse à ruban



- ❑ Sonde électrique (± 0.5 cm)

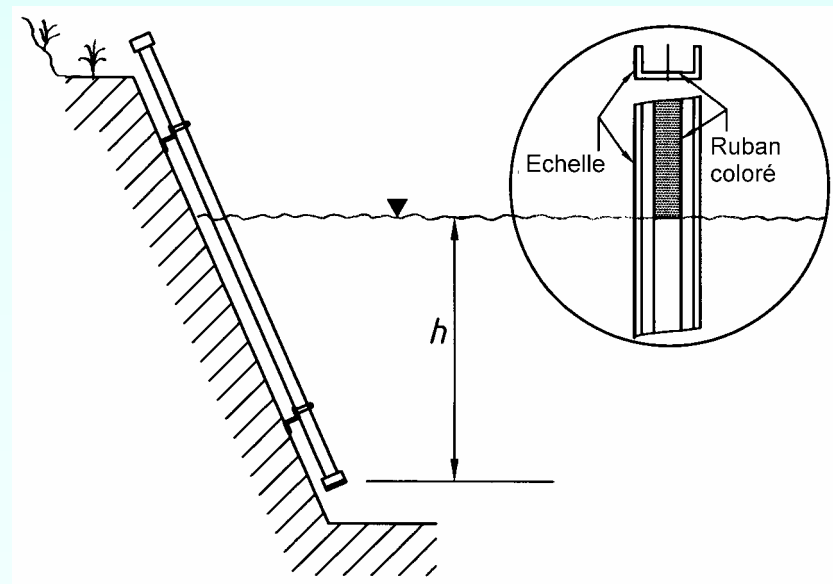


- ❑ Inverse à ruban et signal électrique (± 0.5 cm)



6.3 Limnimètres à maximum

- Enregistre le niveau maximum lors d'une crue
- Echelle de mesure et ruban coloré dans un tube fermé
 - Couleur soluble dans l'eau
 - Pas d'enregistrement du temps
- OFEG: mesure < 4 mois
 - Comparaison avec les traces sur le terrain



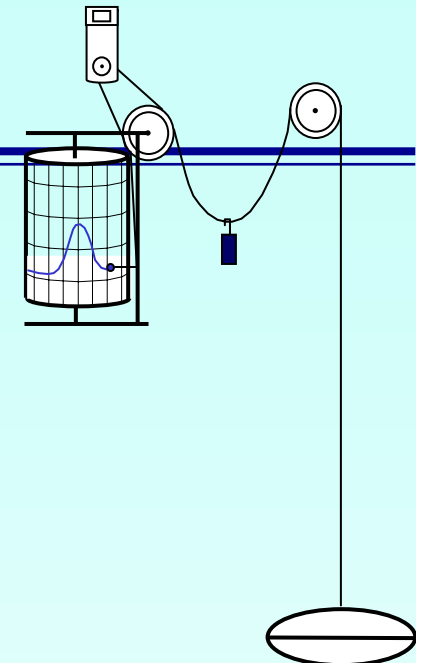
6.4 Enregistreurs à flotteur

□ Principe du limnigraphe

- Enregistrement en continu du niveau d'eau sur papier millimétré
- Précis et entretien facile

□ Equipement

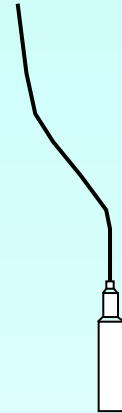
- Flotteur dans un tube ou un puits relié à la rivière
 - Flotteur relié à l'enregistreur par un câble fin
 - Poulie et contrepoids (tension dans le câble)
 - Activation d'un stylo le long du tambour
- Tambour
 - Mouvement d'horloge mécanique ou à pile
 - Echelle:
 - Temps de révolution d'une semaine, d'un mois, ou de trois mois (faibles variations; ex: eau souterraine)
- Local bien ventilé



6.5 Mesure hydrostatique des niveaux

□ Principe

- Mesure de la pression exercée par la hauteur de la colonne d'eau au-dessus du capteur de pression
 - La densité de l'eau ainsi que la pression atmosphérique interviennent aussi



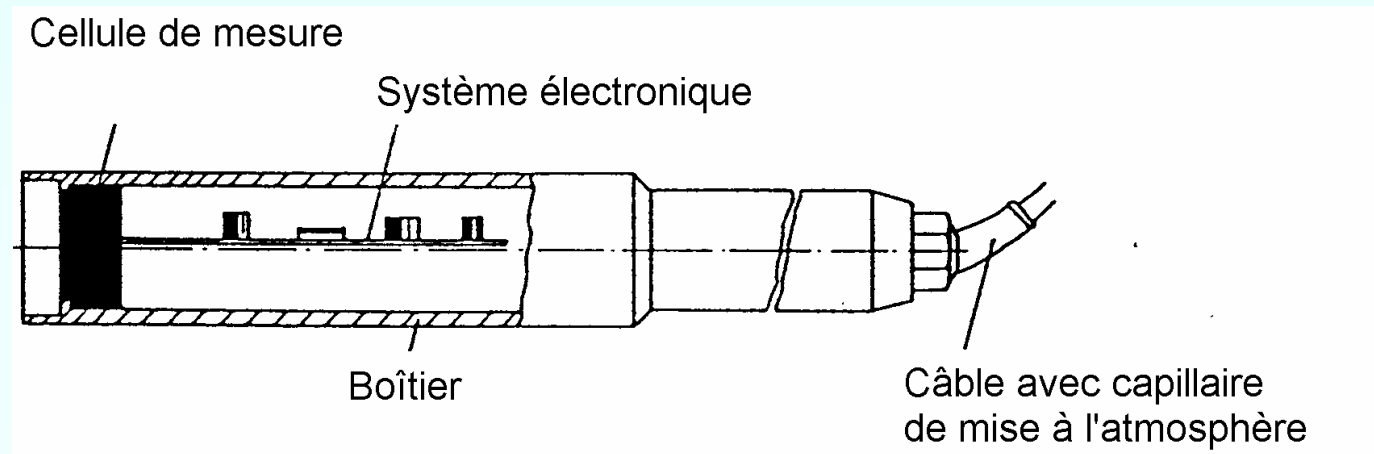
□ Type d'équipement

- Capteurs de pression
- Limnigraphe à bulle

6.5.1 Capteurs de pression (1)

□ Technique

- Installés dans des puits ou directement sur les berges
- Transforme la pression hydrostatique en un signal électrique directement depuis la membrane de mesure
 - Compensation de la pression atmosphérique grâce à un capillaire
- Domaine de mesure 0-4 m ou 0-10 m

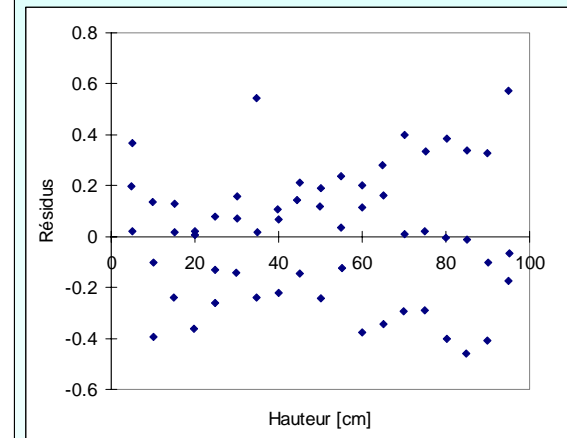
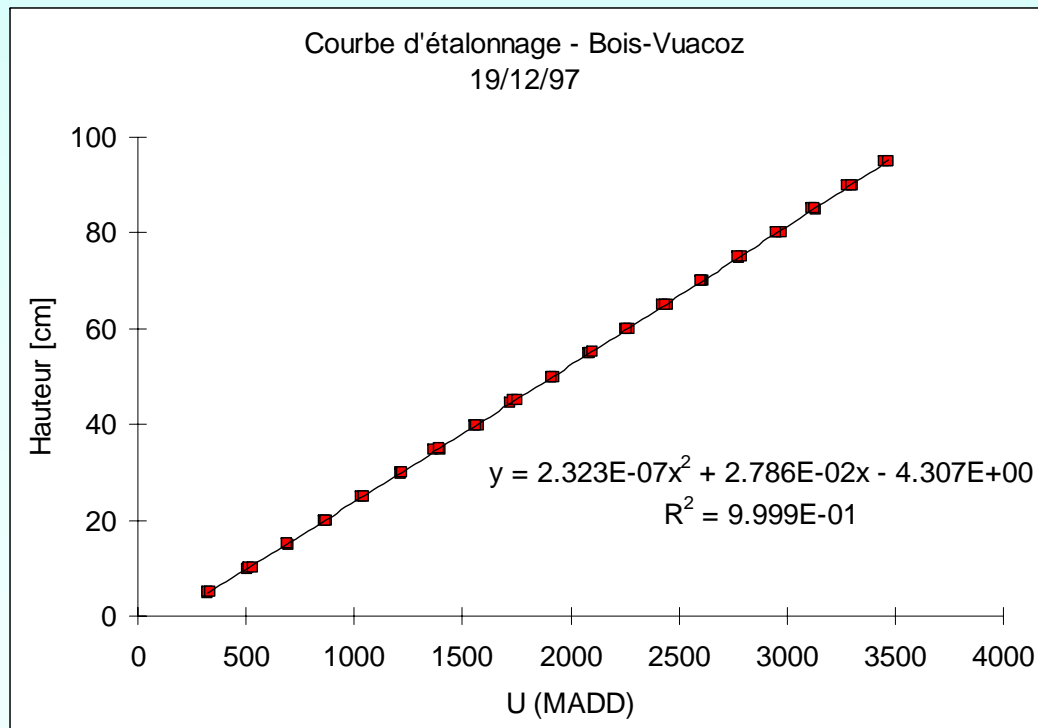
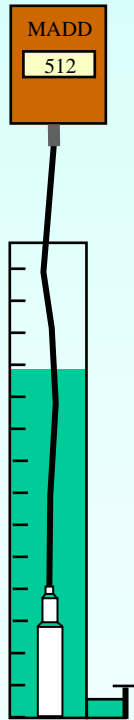


6.5.1 Capteurs de pression (2)

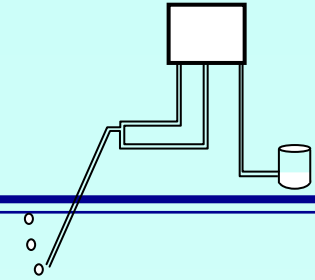
□ Utilisation et entretien

● Etalonnage

- Relation entre la pression et le signal électrique

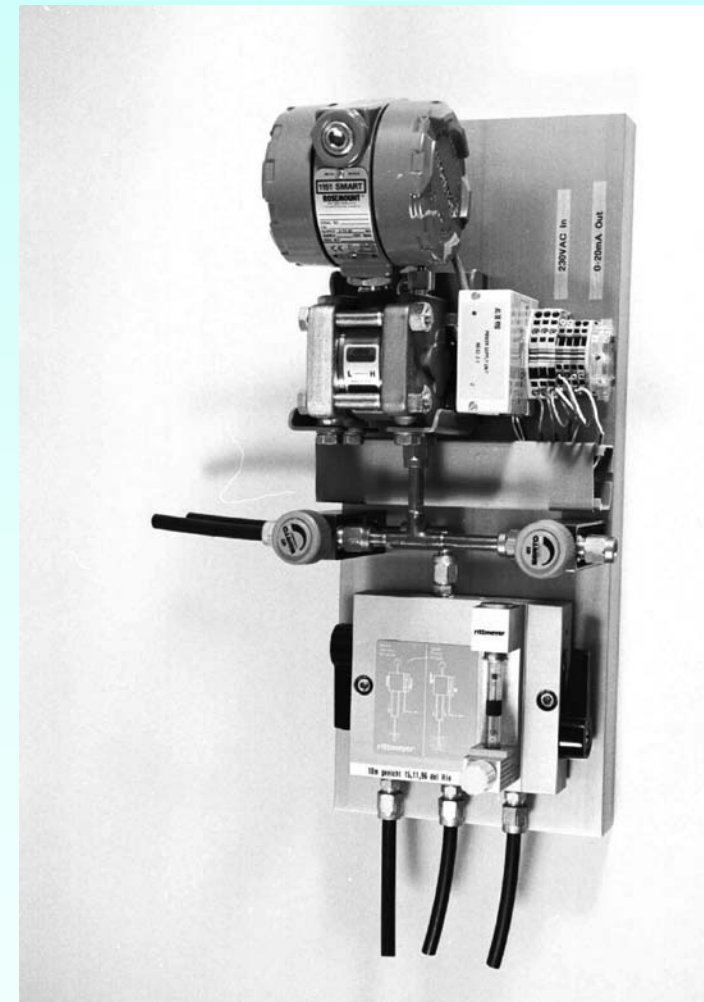


6.5.2 Limnigraphes à bulle (1)



□ Principe

- Pression du gaz s'échappant de la conduite = pression hydrostatique
- Le gaz (air ou azote) est fourni par un compresseur ou une bouteille de gaz comprimé
- La pression dans la conduite est mesurée par une balance à pression ou transducteur qui émet un signal électrique.



6.5.2 Limnigraphes à bulle (2)

1 Alimentation en gaz (air ou azote comprimé)

2 Valve de dosage

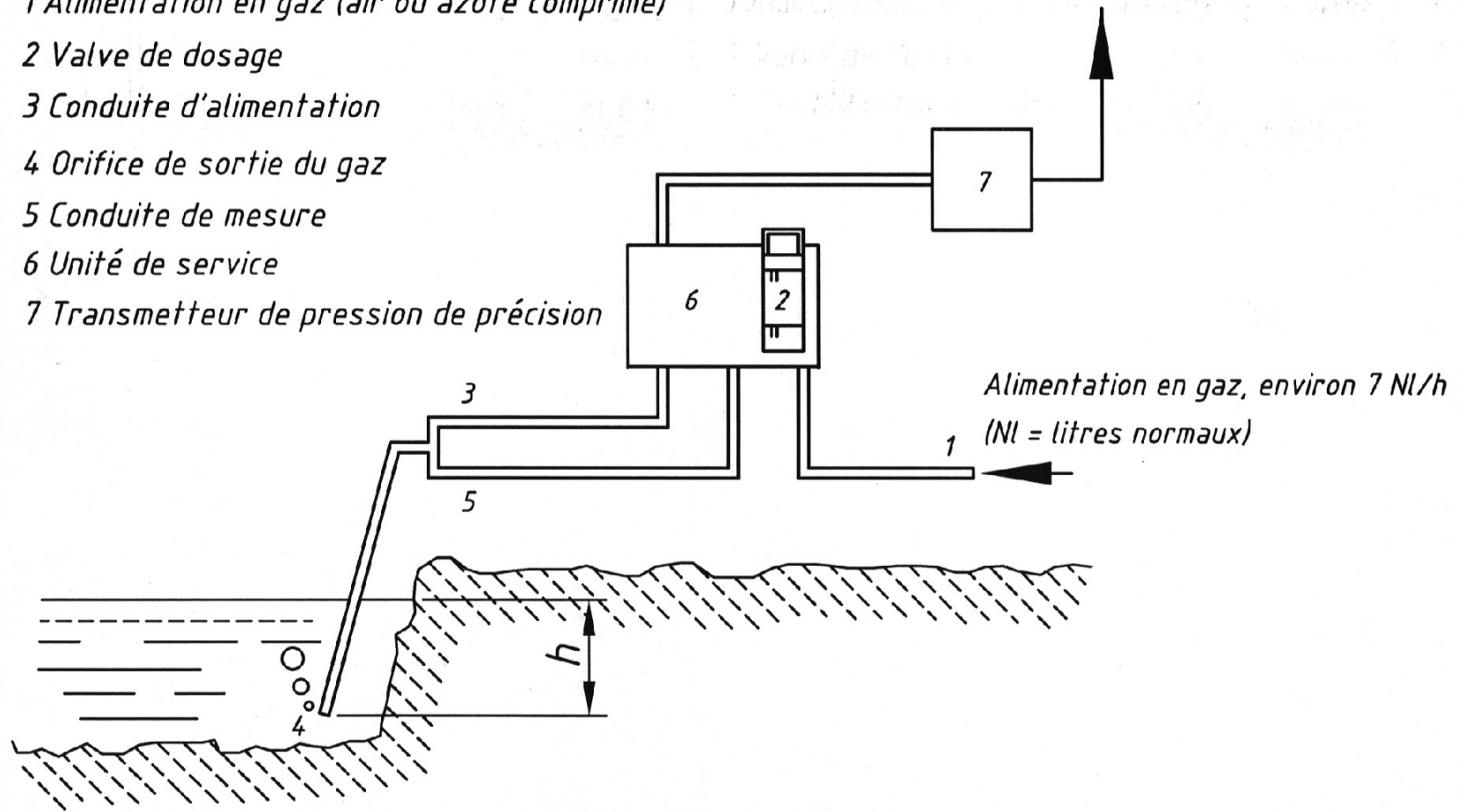
3 Conduite d'alimentation

4 Orifice de sortie du gaz

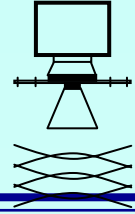
5 Conduite de mesure

6 Unité de service

7 Transmetteur de pression de précision



6.6 Mesure sans contact avec l'eau



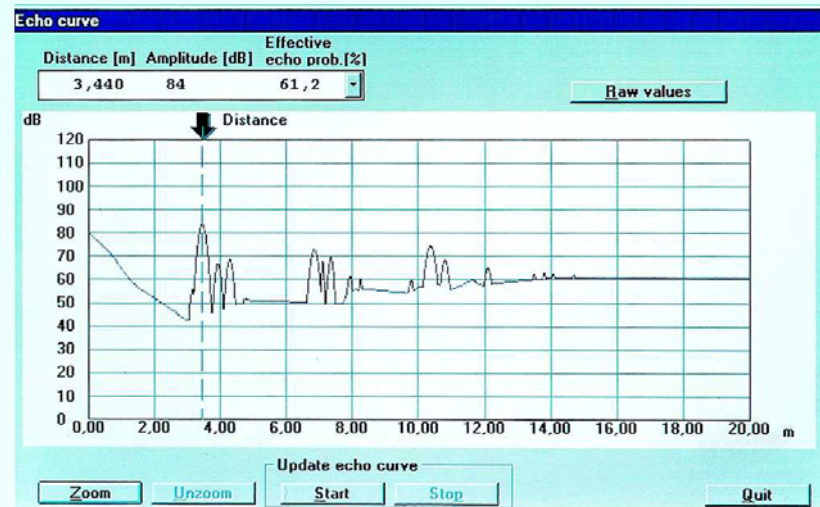
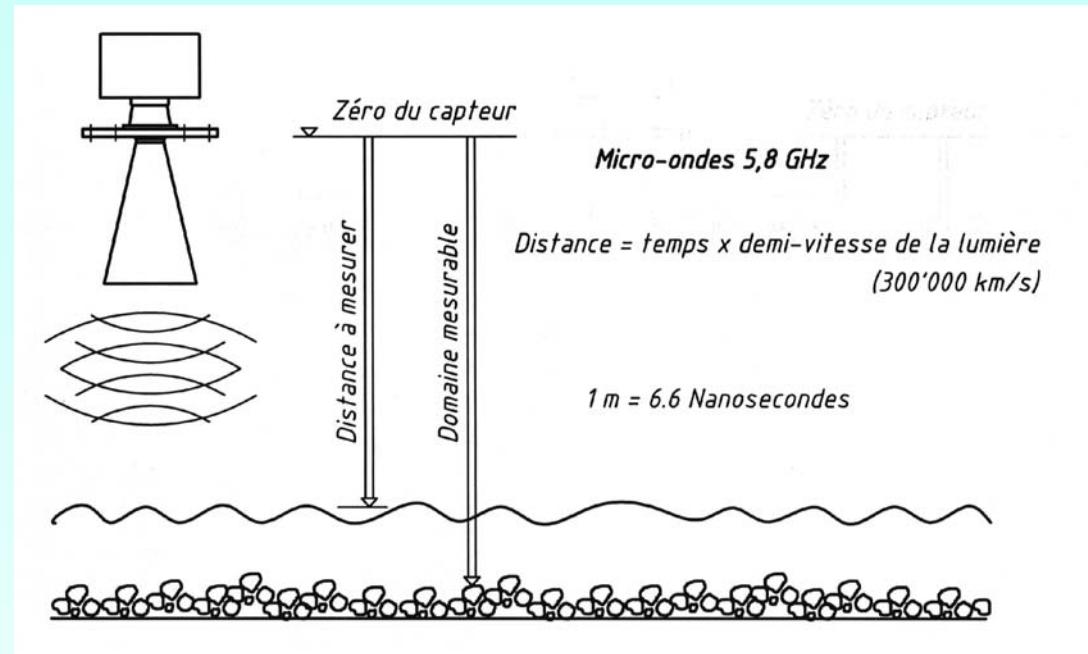
□ Principe

- Emission de signaux radar ou de micro-ondes
 - Temps de transit de l'écho permet de calculer la distance entre le détecteur et la surface de l'eau

3.6.1 Mesure par impulsion radar

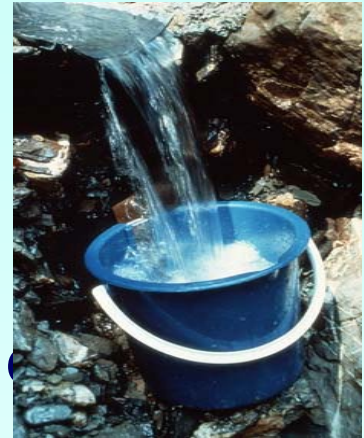
- Micro-ondes dans la bande des 5.8 Gigahertz
 - Pas influencées par la température, le vent, la pluie ou la neige
- Domaine de mesures 0 – 20 m
- Interprétation des signaux
 - L'écho dépend de la conductibilité et de la constante diélectrique du milieu

6.6.1 Mesure par impulsion radar



7 Détermination du débit

- Détermination directe
 - Mesure du volume
 - $Q = \text{Volume} / \text{temps}$
- Détermination indirecte – application courbe
 - Structures hydrauliques: $Q = f(h)$
 - Exploration du champ de vitesse
 - Technique : flotteur, moulinet, bâton de Jens, effet Doppler, ultrason, électromagnétique
 - $Q = V_{\text{moyenne}} * S_{\text{section transversale}}$
 - Approche chimique
 - Méthodes de dilution: $Q = f(c_1/c_2)$

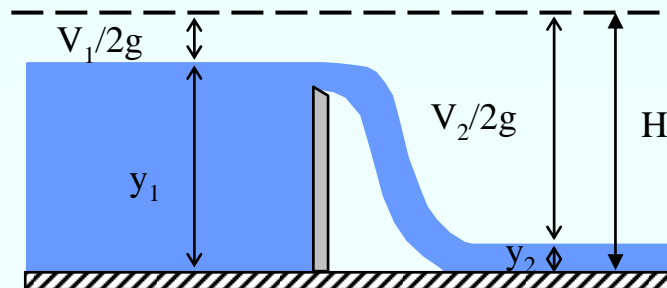


7.1 Structures hydrauliques (1)

- But: Passage à travers un ouvrage à géométrie connue
 - Application des lois de l'hydraulique
 - Détermination de la courbe de tarage
- Principe : Obtenir un régime critique
 - Relation univoque entre le débit Q et la charge h (hauteur au-dessus du seuil) de la forme:

$$Q = K C H^n$$

avec K : coefficient de débit lié à H ; C et n : paramètre dépendant des caractéristiques du seuil



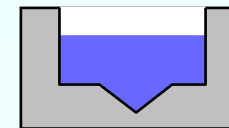
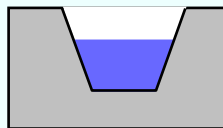
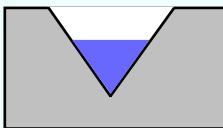
7.1.1 Déversoirs (1)

□ Principe

- Barrages en travers de la rivière par-dessus lequel l'eau s'écoule
- Détermination du débit
 - A chaque type de déversoir est associé une équation particulière qui permet de déterminer le débit



- Classés selon la forme de l'arête



7.1.1 Déversoirs (2)

- Exemple: déversoir rectangulaire avec contraction

$$Q = K \cdot (L - 0.2 \cdot H) \cdot H^{1.5}$$

Q : débit

H : hauteur d'eau sur le seuil

L : longueur de l'arête

K : constante dépend des unités

- Technique simple, peu coûteuse et très répandue
- Cas non adaptés
 - Canaux plats avec pertes de charges
 - Eaux charriant beaucoup de matériaux
 - Prévoir une ouverture pour le nettoyage de la station

7.1.2 Canaux jaugeurs (1)

□ Principe

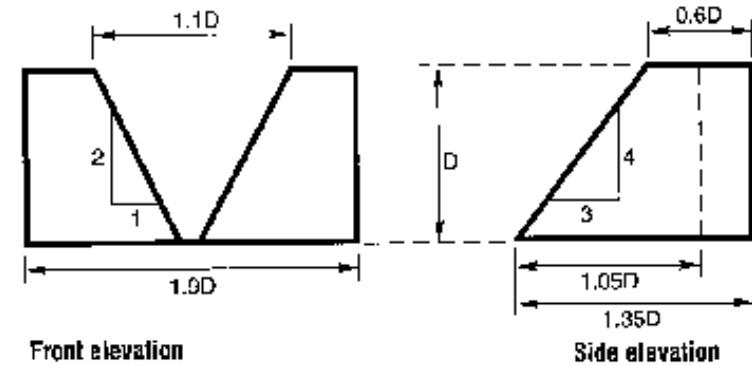
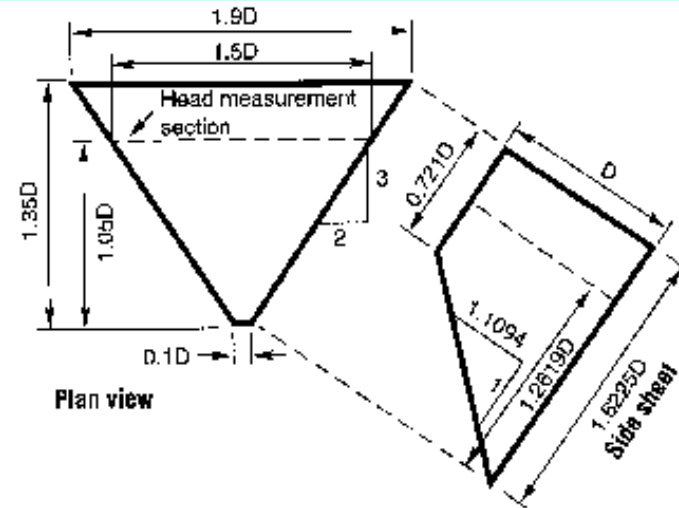
- Section spécialement profilée
 - Section convergente
 - Pente plus forte
 - Augmentation de la vitesse
 - Ecoulement torrentiel
 - Passage par la hauteur critique



7.1.2 Canaux jaugeurs (2)



H-Flume



H Flume

$D = 0.152 \text{ m}$

Charge [m]	l / s	Charge [m]	l / s
0.005	0.0093	0.080	2.2180
0.010	0.0310	0.085	2.539
0.015	0.0662	0.090	2.8870
0.020	0.1182	0.095	3.264
0.025	0.1880	0.100	3.6700
0.030	0.2765	0.105	4.107
0.035	0.3781	0.110	4.5750
0.040	0.4998	0.115	5.076
0.045	0.6388	0.120	5.6030
0.050	0.7981	0.125	6.145
0.055	0.9761	0.130	6.7670
0.060	1.1790	0.135	7.389
0.065	1.4030	0.140	8.0390
0.070	1.6500	0.145	8.734
0.075	1.9250	0.150	9.4650

7.1.4 Choix d'une structure hydraulique

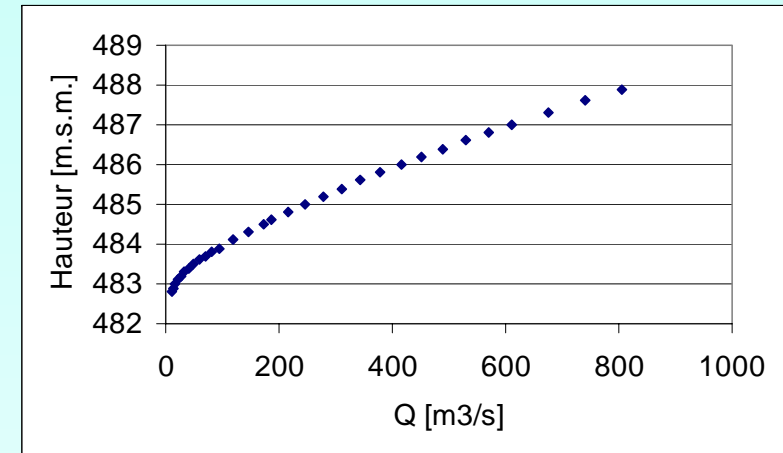
□ Recommandations

- ILRI, 1976. International Institute for Land Reclamation Improvement, Discharge measurement structures, Publication 20, Wageningen, The Netherlands, 464 pp.
- Douglas M. G., Dawson B. D., 1995. Isco open channel, flow measurement, handbook, Isco Environmental Division, Lincoln, Nebraska, 535 pp.

7.2 Approche par jaugeage

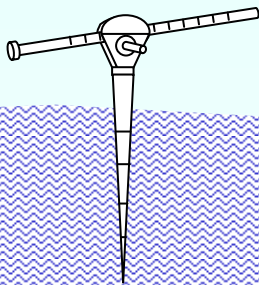
□ But

- Déterminer la courbe de tarage par méthode d'échantillonnage

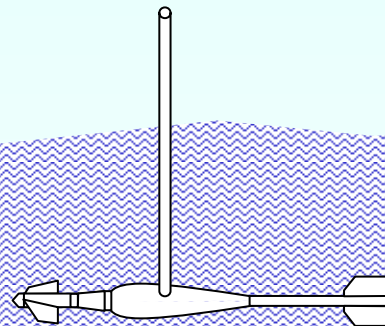


□ Techniques

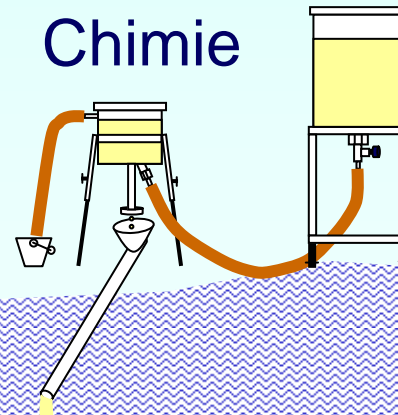
Bâton de Jens



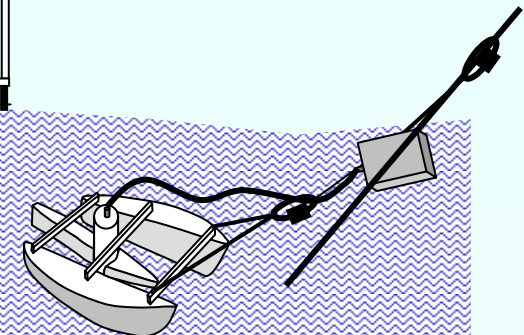
Moulinet



Chimie



ADCP



7.2.1 Exploration du champ de vitesse

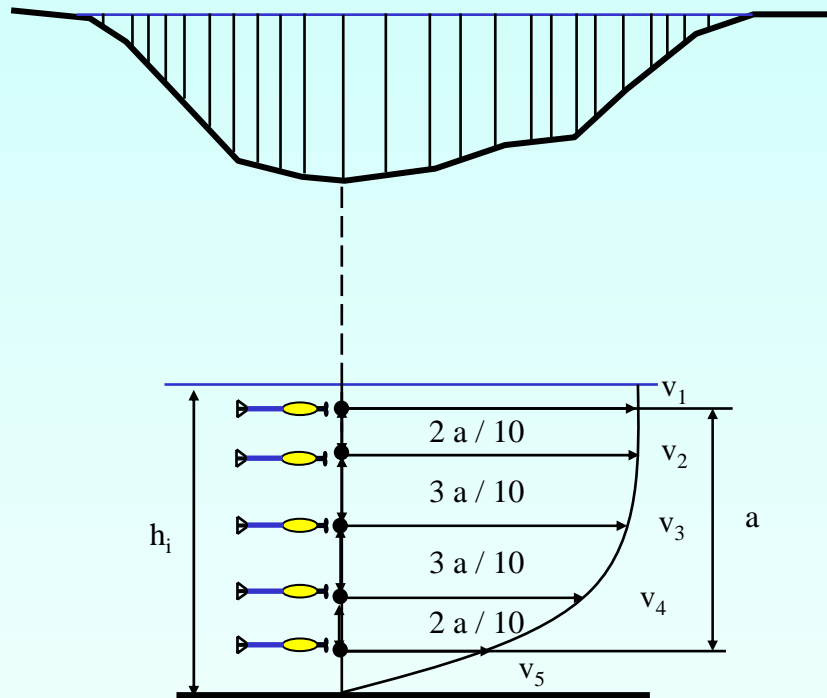
□ Principe

- Echantillonnage du champ de vitesse et détermination de la section transversale

$$Q = V_{\text{moyenne}} * S_{\text{section transversale}}$$

7.2.1.1 Jaugeage au moulinet (1)

□ Mise en oeuvre



Polygone des vitesses $q_i = \int_0^{h_i} v_j dh \quad [\text{m}^2/\text{s}]$

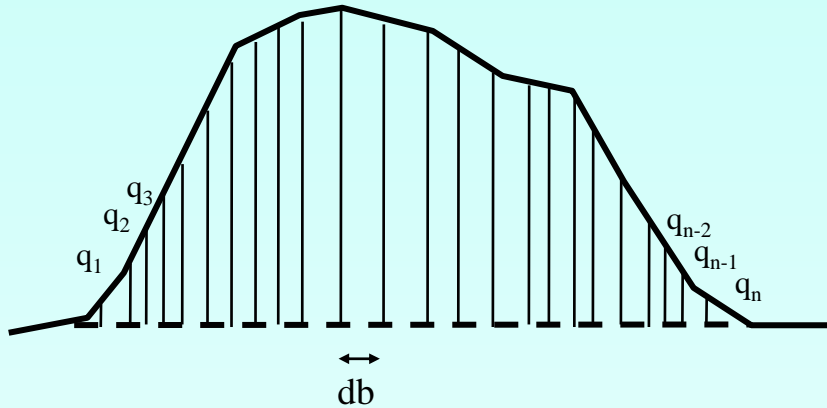
● Choix des verticales

- Avant le début du jaugeage
- Nombre 20 - 25
- Selon le profil et les conditions d'écoulement
- $8 \text{ m} > \text{distance} \geq \text{diamètre du moulinet}$

● Nombre de points par verticale

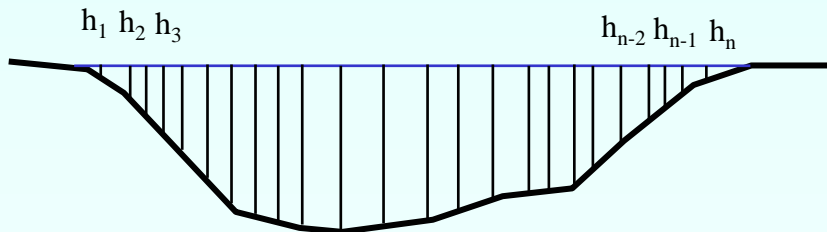
- 5 points
 - 1^{er} aussi prêt que possible de la surface
 - 5^e aussi bas que la perche le permet

7.2.1.1 Jaugeage au moulinet (2)



- Détermination du débit

$$Q = \int_0^n q_i db \quad [\text{m}^3 / \text{s}]$$



- Détermination de la vitesse

$$S = \int_0^n h_i db \quad [\text{m}^2]$$

$$V = Q / S \quad [\text{m/s}]$$

7.2.1.1 Jaugeage au moulinet (5)

- Téléphériques



7.2.2 Jaugeage chimique (1)

- Recommandé pour les sites où les autres méthodes ne conviennent pas
 - Faible profondeur
 - Fortes pentes
 - Vitesse très élevée
 - Importante turbulence
- Conditions générales à respecter
 - Mélange complet et homogène
 - Pas d'absorption ni de détérioration du traceur
 - Débit de la rivière constant pendant l'expérimentation

7.2.2 Jaugeage chimique (2)

□ Choix des traceurs

- Propriétés
 - Bonne solubilité et stabilité
 - Absent dans les eaux naturelles
 - Coût (traceur - analyse)

□ Traceurs utilisés au SHGN

- Uranine
 - Détérioration à la lumière
 - Longueur du tronçon
 - Compromis lumière - mélange
 - Faibles concentrations
- Chlorure de sodium
 - Quantité importante
 - Pas adapté en hiver



7.2.2.1 Méthode d'injection à débit constant (1)

□ Principe

- Injection du traceur en solution pendant un temps déterminé
 - Durée de l'injection de telle sorte que la concentration du traceur dans la rivière reste constante

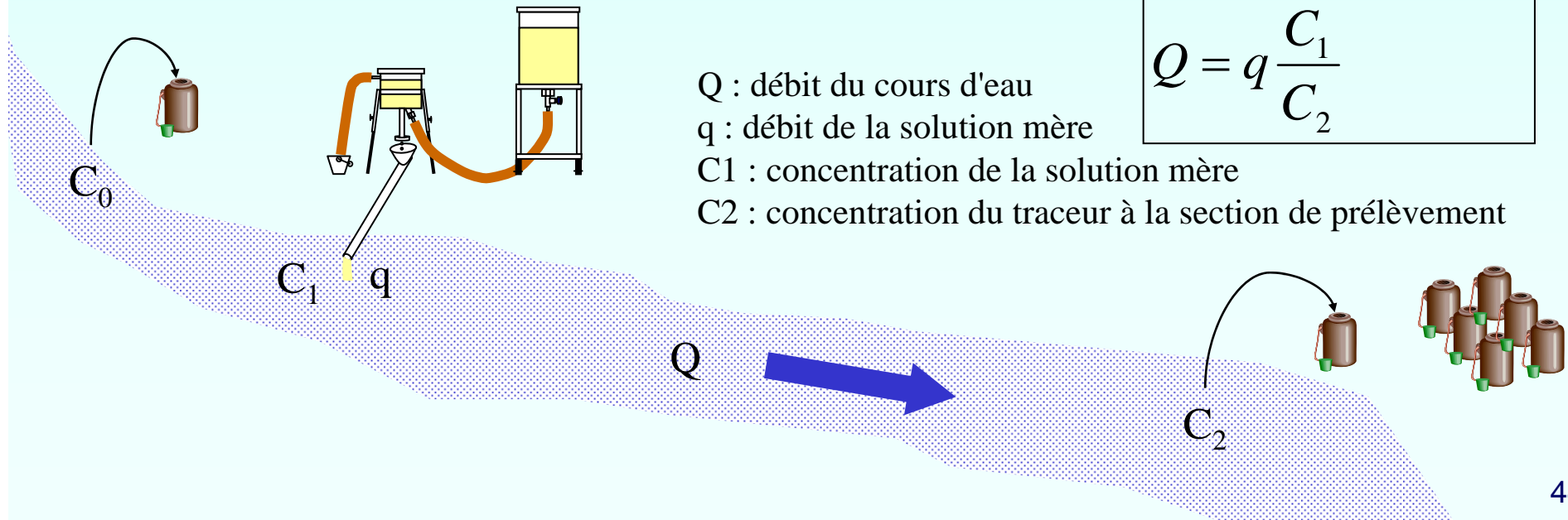
$$q \cdot C_1 = (Q + q) \cdot C_2$$
$$Q = q \frac{C_1}{C_2}$$

Q : débit du cours d'eau

q : débit de la solution mère

C₁ : concentration de la solution mère

C₂ : concentration du traceur à la section de prélèvement



7.2.2.2 Méthode par intégration (1)

□ Principe

- Injection instantanée du traceur en solution dans la rivière
 - Le volume et la concentration de la solution mère est connue
 - Suivi des concentrations du traceur dans la rivière
 - Echantillonnage
 - Sondes

$$M_1 = M_2$$

$$V_1 \cdot C_1 = V_2 \cdot \overline{C_2}$$

$$V_1 \cdot C_1 = Q \cdot T \cdot \overline{C_2}$$

$$Q = \frac{V \cdot C_1}{T \cdot \overline{C_2}}$$

$$\overline{C_2} = \frac{\int_0^T c_t dt}{T}$$

M_1 : masse du traceur dans la solution

M_2 : masse du traceur dans la rivière

V_1 : volume de la solution

V_2 : volume d'eau transité dans la rivière

C_1 : concentration du traceur dans la solution

$\overline{C_2}$: concentration moy. du traceur dans la rivière

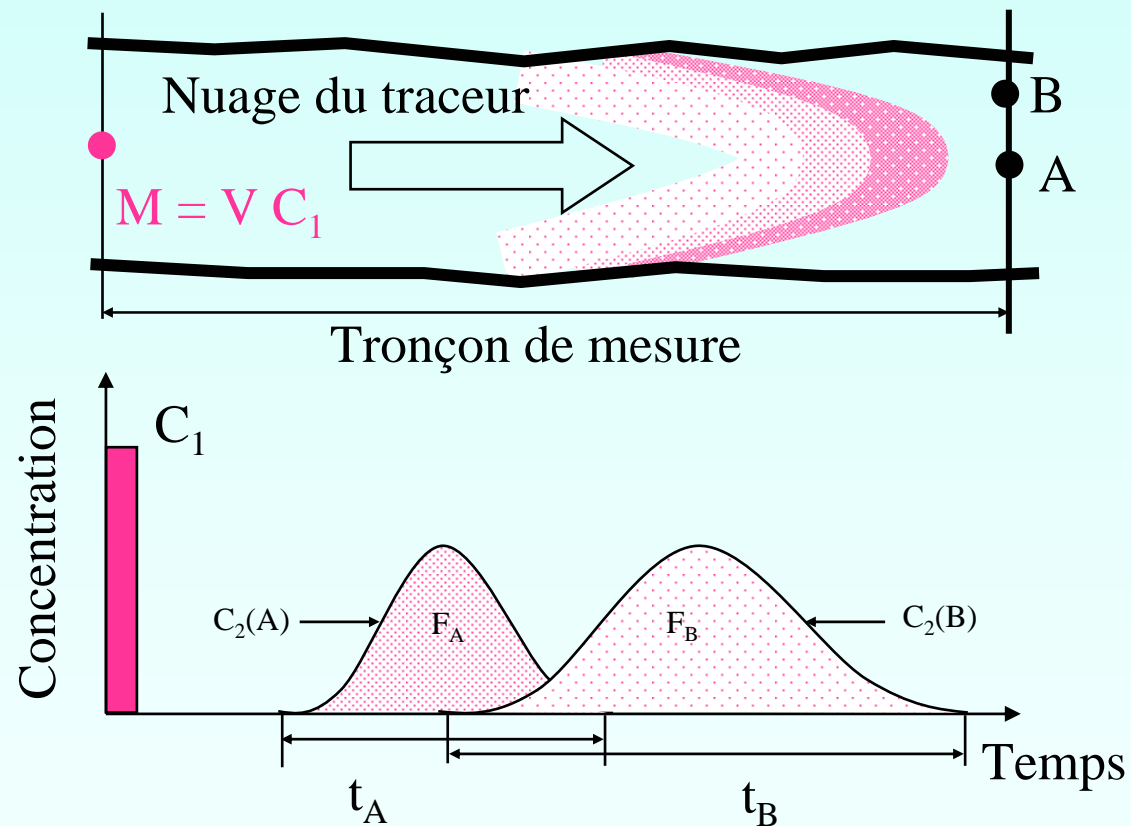
Q : débit de la rivière

T : durée totale des prélèvements

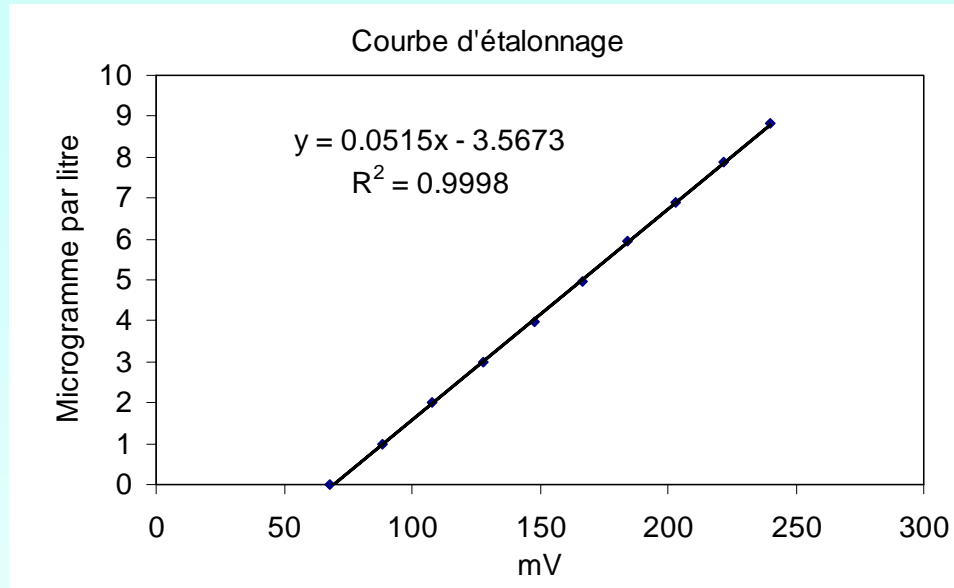
c_t : concentration du traceur dans la rivière au temps t

7.2.2.2 Méthode par intégration (2)

- Echantillonnage à n'importe quel point



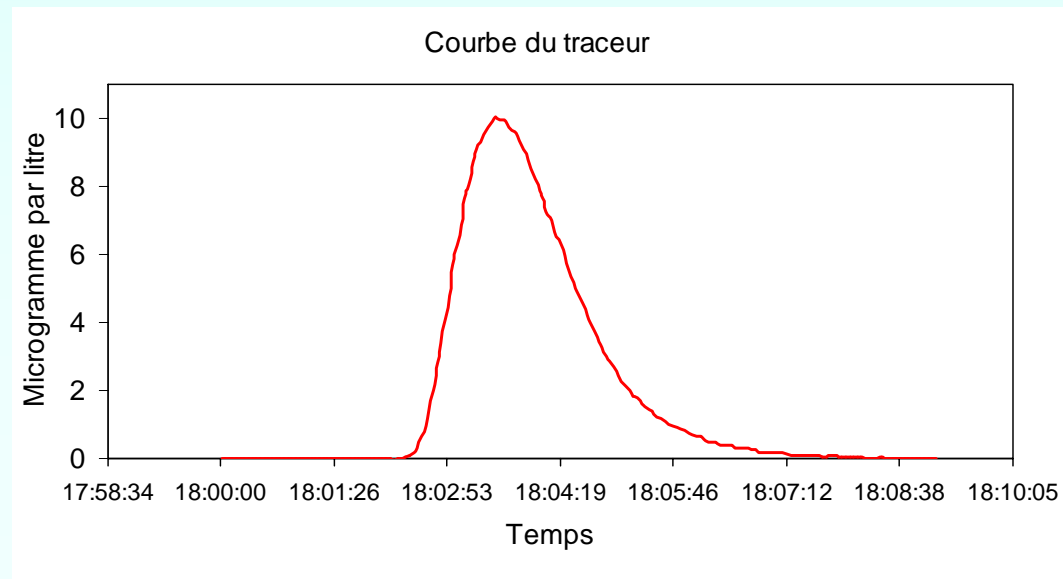
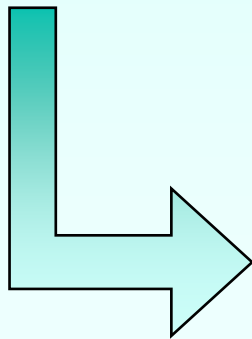
7.2.2.2 Méthode par intégration (3)



□ Détermination du débit

$$Q = \frac{M_1}{T \int_0 c_t dt}$$

↑
Intégration



8.1.1 Cas de l'OFEG

□ Connexions aux stations

