Ministère de l'Industrie,
des Postes et Télécommunications
et du Commerce extérieur

DOCUMENT PUBLIC

méthodologie du jaugeage des sources

décembre 1994
R 38193

BRGM
L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE

Étude réalisée dans le cadre des
actions de Service public du BRGM
94 - D - 070

Ministère de l'Industrie,
des Postes et Télécommunications
et du Commerce extérieur

DOCUMENT PUBLIC

méthodologie du jaugeage des sources

J.R. DAUM

décembre 1994
R 38193

BRGM
L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE

Étude réalisée dans le cadre des
actions de Service public du BRGM
94 - D - 070

BRGM
Centre Thématique EAU
1039, rue de Pinville
34000 - MONTPELLIER
Tél : (33) 67.15.79.80

Mots clés : Source, Captage, Jaugeage, Déversoir, Seuil jaugeur, Limnigraphe, Capteur de pression, Compteurs.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

DAUM J.R. (1994) - Méthodologie du jaugeage des sources. Rapport BRGM R 38193, 68 p., 38 fig., 5 tabl., 13 photos.

Table des Matières

RÉSUMÉ 2
INTRODUCTION 3
1. DIFFERENTS TYPES DE SOURCE 4
2. DIFFERENTS TYPES DE CAPTAGE 6
3. RAPPEL DES BASES THEORIQUES 10
4. LES METHODES ET EQUIPEMENTS DE MESURES DES DEBITS 12
4.1. LES METHODES VOLUMETRIQUES : 12
4.2. AUTRES METHODES DE MESURE EN SORTIE DE CONDUITES 13
4.2.1. Méthodes d'évaluation rapide 13
4.2.2. Méthode du diaphragme 15
4.2.3. Les danaïdes 18
4.3. MESURES SUR CONDUITES FORCEES 19
4.3.1 Méthodes basées sur les mesures différentielles de pression 19
4.3.2. Méthodes basées sur les mesures de vitesse 21
4.4. METHODES DE MESURE POUR LES ECOULEMENTS A SURFACE LIBRE 21
4.4.1. Mesures sur les sections naturelles d'écoulement 21
4.4.2. Les déversoirs 23
4.4.3. Les seuils ou canaux jaugeurs 28
4.4.4. Les orifices latéraux et vannes de fond 31
4.4.5. Les mesures de hauteurs d'eau 34
4.4.6. Les mesure des vitesses 40
4.4.7. L'établissement des courbes de tarage 44
4.4.8. Dépouillement et traitement des données 45
4.5. METHODES PAR DILUTION 45
4.5.1. Méthode par injection continue 45
4.5.2. Méthode par injection instantanée 47
5. EXEMPLES D'INSTALLATION DE JAUGEAGE EN FRANCE 48
6. RECOMMANDATIONS POUR L'EVALUATION DE PROJETS D'INSTALLATION 59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 64
PRINCIPALES NORMES FRANCAISES ET INTERNATIONALES CONCERNANT LES MESURES DE DEBIT DES LIQUIDES DANS LES CANAUX DECOUVERTS 68

RÉSUMÉ

Le présent travail a été réalisé dans le cadre du programme 1994 des actions de Service Public du BRGM, sur financement du Ministère de l'Industrie, des Postes et Télécommunications et du Commerce extérieur.

Son objectif est de guider les responsables de réseaux hydrologiques de base comportant des jaugeages de sources, dans le choix d'une méthode et d'un équipement de mesure.

Après une revue des différents types de source et des principaux types de captage, les éléments théoriques de base concernant les écoulements d'eau sont rappelés à la mémoire du lecteur.

Les différentes méthodes de mesure des débits sont ensuite énumérées (principe, équipement, précision, limites d'application), tout d'abord pour les écoulements en conduites forcées, ensuite pour les écoulements à surface libre.

Enfin, quelques exemples illustrés d'équipement de jaugeage (en France) sont présentés, ainsi qu'un rappel de recommandations pour l'évaluation de projets d'installation.

INTRODUCTION

Faisant référence à la définition du Dictionnaire français d'hydrogéologie (G. Castany, J. Margat, BRGM, 1977), le terme de source désigne à la fois le lieu, le phénomène d'apparition et l'écoulement naturel d'eau souterraine à la surface du sol.

D'un point de vue physique il y a source lorsque le potentiel hydraulique de l'eau souterraine en un point, appelé aussi niveau piézométrique, est supérieur à l'altitude de ce point, et que la nature des terrains (perméabilité, fissuration, fracturation ou cavités) ne s'oppose pas à l'émergence de l'eau souterraine.

Le terme de source est également réservé aux émergences assez bien individualisées et relativement localisées.

Les sources constituent une partie des exutoires naturels des eaux souterraines. C'est la partie visible (exception relative faite du cas des sources submergées) et assez directement mesurable de ces exutoires, l'autre partie représentant les écoulements souterrains diffus (et non mesurables directement) vers les cours d'eau, lacs, mers et océans, et, le cas échéant, l'évapotranspiration à partir de la surface libre des nappes d'eau souterraines (exfiltration).

Les débits des sources sont donc, en premier lieu, un des éléments déterminants du bilan hydraulique des eaux souterraines.

Par ailleurs l'enregistrement et l'étude des variations de ces débits dans le temps (en particulier l'interprétation des courbes de tarissement, ou la réalisation et le calage de modèles de relation pluies-débits) peut permettre l'acquisition, ou du moins l'approche, de paramètres caractéristiques du réservoir aquifère tels que volume total, coefficient d'emmagasinement moyen, transmissivité ou perméabilité moyenne, ainsi que l'estimation de la réalimentation de l'aquifère.

Enfin, le captage d'une source constitue souvent une solution à une demande locale en eau, en particulier dans les karsts où le captage par forage rencontre certaines difficultés. En fonction des besoins et selon l'existence de contraintes sur les niveaux de la nappe et sur l'écoulement en aval, le débit d'exploitation de la source pourra être inférieur, égal ou supérieur à son débit naturel. Dans tous les cas une des premières données du projet d'exploitation sera la connaissance de ce débit naturel et de ses variations saisonnières.

Les mesures du débit des sources, sont par conséquent l'une des tâches courantes de l'hydrogéologie, et d'une importance essentielle dans les études d'évaluation de ressources en eau .

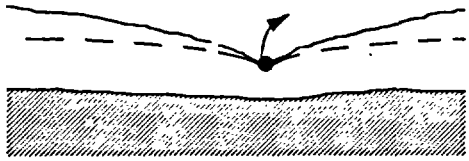
1. DIFFERENTS TYPES DE SOURCE

Les principaux types de sources sont résumés dans les schémas de principe ci-dessous :

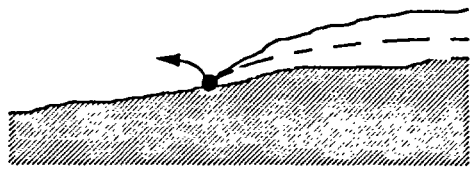
dans les aquifères de type poreux ou fissuré ou fracturé :

– **pour les nappes libres :**

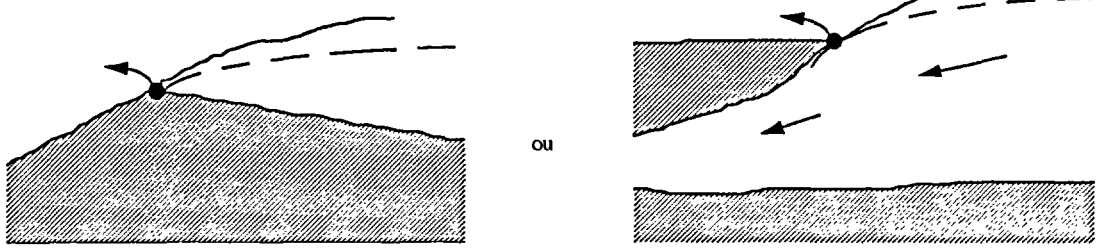
-Les sources de dépression



-Les sources de déversement



-Les sources de débordement ou de trop-plein

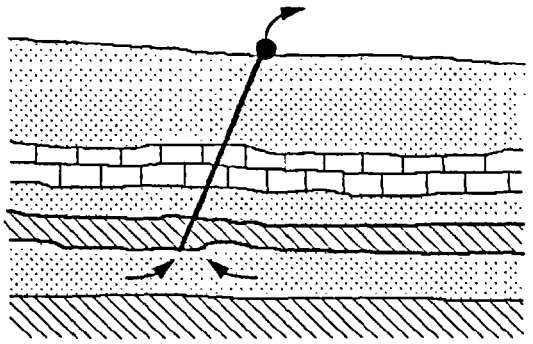


Les termes de débordement ou de trop-plein (qui sont en fait synonymes) sont souvent employés indistinctement dans les deux derniers cas de figure. Certains auteurs réservent un terme à l'un ou l'autre des schémas. En fait c'est uniquement la position de l'exutoire par rapport à l'écoulement général de la nappe qui différencie ces deux schémas.

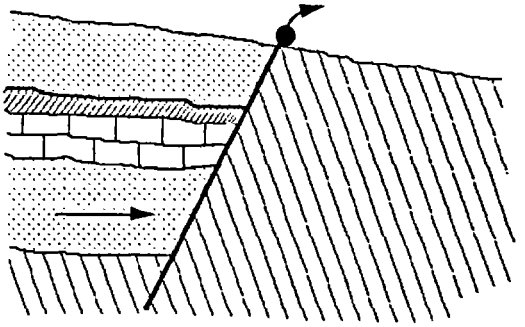
Il est à noter que pour les sources de dépression, et de débordement (trop-plein) une baisse continue du niveau de la nappe provoquera à un moment donné un arrêt total du débit. Pour les sources de déversement la baisse continue du niveau de la nappe ne provoquera qu'une diminution continue du débit (qui tendra à la limite vers zéro de manière asymptotique).

– **pour les nappes captives :**

-les sources artésiennes de fracture

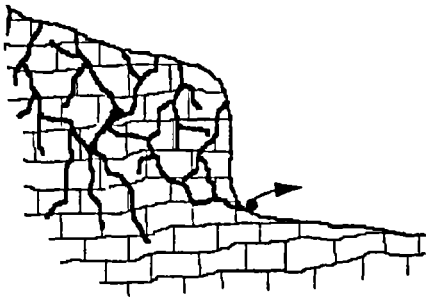


-les sources artésiennes sur limite étanche ou de faille

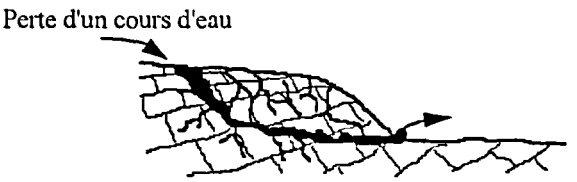


– **dans les aquifères de type karstique :**

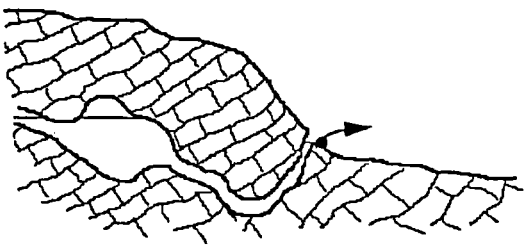
-Les exsurgences



-Les résurgences



-Les sources vauclusiennes



2. DIFFERENTS TYPES DE CAPTAGE

La mesure du débit d'une source, de même que son exploitation en tant que ressource, nécessite toujours un aménagement, si sommaire soit-il, du site de l'émergence. Cet aménagement est appelé captage.

Il faut évidemment distinguer le captage (souvent provisoire) destiné uniquement à permettre la mesure du débit naturel, du captage prévu pour la protection, le transfert et l'utilisation de la ressource en eau (ce dernier devant permettre également dans la majorité des cas la mesure des débits).

Quelque soit l'objectif final, le captage a pour premières fonctions :

- assurer au maximum et de manière permanente le libre écoulement de l'eau à partir de la formation réservoir.

Il est donc nécessaire de dégager l'émergence de tous les obstacles végétaux (herbes, broussailles, ronces, branchages, etc.) ou rocheux de recouvrement tels qu'éboulis, galets, sables, limons, etc., qui peuvent limiter le débit naturel de la source.

- canaliser le flux total de la source (après l'avoir collecté, dans le cas d'émergences diffuses ou multiples) :
    - soit dans un canal à section naturelle, ou une simple tranchée,
    - soit dans un canal bétonné, ou maçonné-cimenté, etc.,
    - soit dans une conduite fermée (matériaux divers).

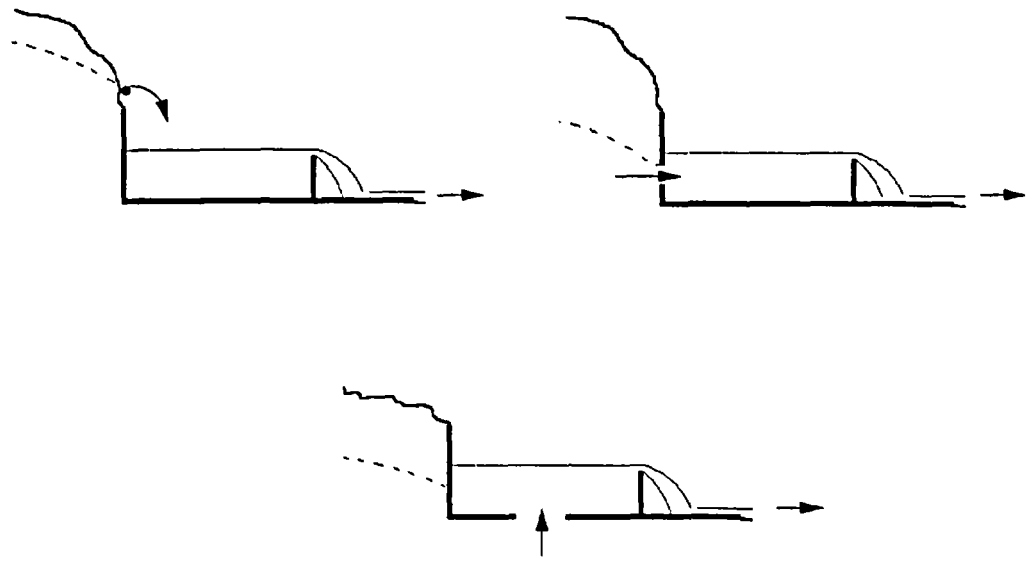
Le jaugeage du débit des sources pourra donc se ramener à la mesure du débit d'un écoulement de surface (section naturelle ou canaux à surface libre), ou à la mesure du débit transmis par une conduite ou en sortant.(écoulement en charge).

REMARQUE : Les captages d'exploitation comportent fréquemment un réservoir intermédiaire, dans lequel la continuation du transfert de l'eau s'effectue soit par vidange, soit par pompage. Dans ce cas, et si aucun équipement de mesure n'existe en amont du réservoir, la mesure du débit naturel de la source pourra être effectuée en aval du réservoir à condition de s'assurer que le niveau d'eau dans le réservoir est stabilisé (ou d'agir pour le stabiliser).

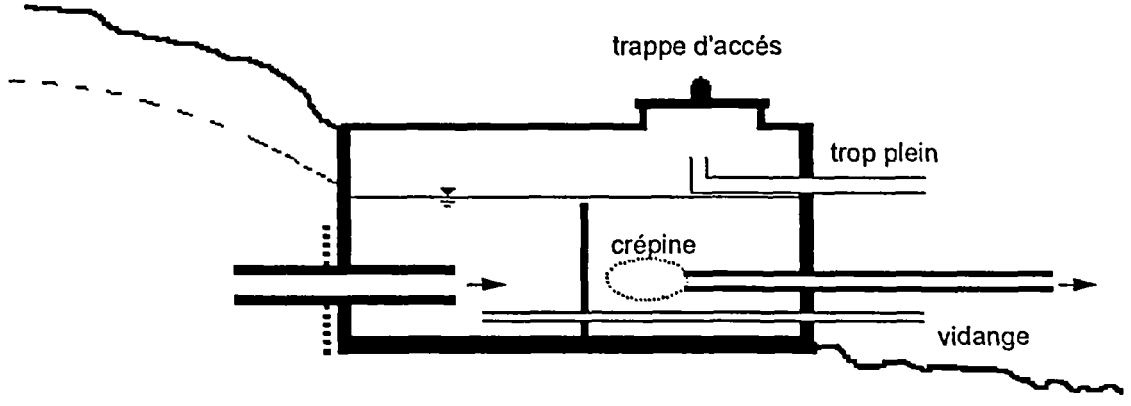
Le captage proprement dit de l'émergence (ou des émergences) peut être plus ou moins naturel ou facilité par la construction d'un ou plusieurs drains (horizontaux ou obliques), ou d'un ou plusieurs puits verticaux, voire une combinaison de drains et de puits.

En fonction des caractéristiques naturelles des émergences et des roches réservoirs, ainsi qu'en fonction de la topographie du site, il existe (et l'on peut imaginer) une très grande variété de captages différents. Néanmoins ceux ci peuvent être regroupés parmi les **principaux types suivants :**

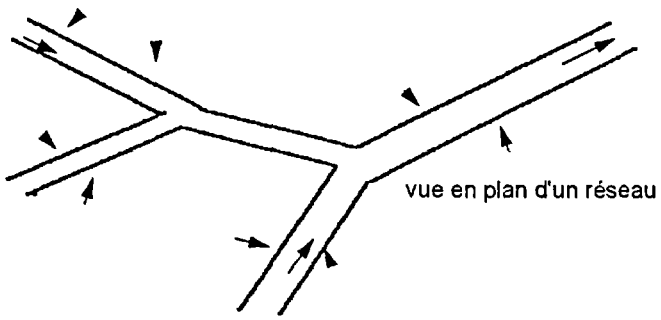
- **Bassin collecteur** à l'air libre construit (en maçonnerie ou béton) en dessous, autour ou par dessus l'exutoire naturel. Ce type est applicable aux sources dont l'exutoire est en hauteur , latéral ou par le bas. L'écoulement de sortie se fait par canal ou par conduite.

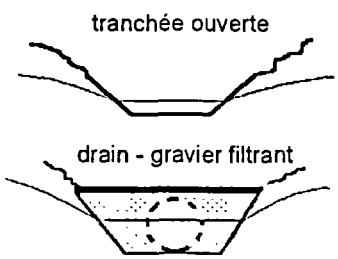


- **Chambre captante** fermée dont l'alimentation par la source a été facilitée par la construction d'un drain, d'une galerie ou de barbacanes. Ce type de captage est généralement utilisé dans le cas d'émergences latérales ou par le bas. L'écoulement de sortie se fait par conduite. La chambre de captage est également munie d'une conduite de trop plein et d'une conduite de vidange.



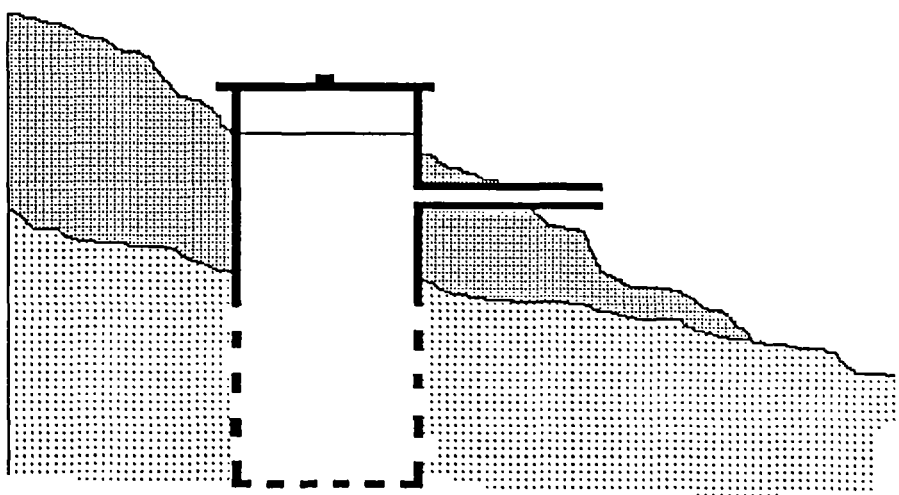
- **Tranchées drainantes**, soit à l'air libre, soit munies de drains remblayés par un massif de graviers filtrants, et se rejoignant dans un bassin ou réservoir de collecte. Ce système s'utilise dans le cas d'émergences multiples ou diffuses.



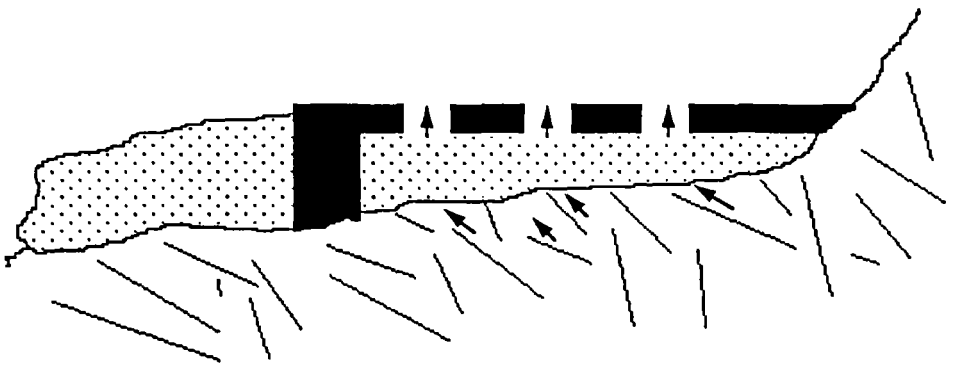


– **Puits captant** creusé au droit de l'émergence et cuvelé (maçonnerie, béton ou cuvelage métallique).

L'écoulement de sortie se fait par gravité ou pompage de reprise. Ce type de captage est utilisé lorsque l'émergence se fait au travers de formations de recouvrement limitant le débit ou également pour assurer une meilleure protection de la ressource utilisée.



- **Captage par surcharge solide** : dans le cas d'émergences diffuses au travers d'alluvions, on peut recouvrir les alluvions d'un radier en maçonnerie ou en béton, faisant barrage à l'aval, et permettant la sortie des eaux par des ouvertures ou cheminées ménagées en son toit. Les eaux sont ensuite collectées par des rigoles creusées dans la chape. Ce procédé avait déjà été utilisé par les Romains pour capter les sources thermales de Plombières dans les Vosges.



3. RAPPEL DES BASES THEORIQUES

Définition du débit d'un écoulement d'eau :

Nous nous limiterons à la notion de débit volumétrique.

Le débit moyen d'un écoulement pendant le temps T est le rapport du volume écoulé au temps correspondant

$$Q = \frac{V}{T} \text{ dimension } L^3.T^{-1}$$

Le débit instantané est la différentielle : $\frac{dV}{dt}$

De par sa définition, le débit est également le produit d'une section (surface) par une vitesse $L^2.L.T^{-1}$

Les unités de débit les plus fréquemment utilisées en hydraulique , hydrologie et hydrogéologie sont :

l/s, m^3/s, m^3/h, m^3/jour, hm^3/an, km^3/an

- **Ecoulement à surface libre :**

écoulement de l'eau au contact de l'atmosphère (exemple : dans un canal, une rivière)

- **Ecoulement en charge :**

écoulement de l'eau sans contact avec l'atmosphère (exemple : dans une conduite)

- **Ecoulement en régime permanent :**

l'écoulement est en régime permanent lorsque son débit en toute section est indépendant du temps En une section déterminée (section mouillée constante dans le temps) sa vitesse est donc constante dans le temps.

dans le cas contraire l'écoulement est en régime variable (encore appelé non permanent, ou transitoire).

- **Ecoulement uniforme :**

C'est un écoulement permanent à section mouillée constante dans l'espace. Théoriquement il ne peut être réalisé que dans un canal artificiel à section, pente et rugosité constantes. Dans ce cas la ligne d'eau est parallèle à la ligne de pente du radier du canal, et le débit est uniquement fonction de la hauteur d'eau (relation univoque).

- **Ecoulement en régime laminaire :**

L'écoulement est qualifié de laminaire lorsque les trajectoires des particules d'eau sont des filets parallèles, c'est à dire qu'en aucun point de la section d'écoulement les vitesses n'ont une composante transversale.

dans le cas contraire l'écoulement est en régime turbulent.

Dans les écoulements à surface libre, comme dans les écoulements en charge la limite entre régime laminaire et régime turbulent est liée à la viscosité cinématique de l'eau, à sa vitesse et au rayon hydraulique ,par l'intermédiaire d'un coefficient sans dimension, appelé nombre de Reynolds et étant égal à :

pour les écoulements à surface libre $\mathrm{Re} = v\frac{R}{\nu}$

pour les écoulements en charge $\mathrm{Re} = v\frac{D}{\nu}$

avec v = vitesse moyenne sur la section
R = rayon hydraulique = rapport de la section mouillée au périmètre mouillé (pour les écoulements à surface libre le périmètre mouillé n'inclus pas la partie en contact avec l'atmosphère)
ν = viscosité cinématique dimension $L^2.\ T^{-1}$ (toutes ces grandeurs étant exprimées en unités C.G.S.)

Pour les écoulements en charge en conduite circulaire D est le diamètre de la conduite, pour les conduites non circulaires on prend $D = 4 \times R$.

Le régime est laminaire lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à 500 (écoulements à surface libre), ou à 2000 (écoulements en charge). Au dessus de ces valeurs le régime est turbulent.

La vitesse de l'écoulement correspondante à ces valeurs est appelée vitesse critique.

Théorème de Bernoulli :

Pour un fluide incompressible, en écoulement permanent et sans existence de forces de frottement, la charge (ou énergie spécifique, c'est à dire rapportée à l'unité de poids) est constante le long d'une ligne de courant.

$$E = Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \mathrm{Cste}.$$

avec Z = altitude
p = pression
ρ = masse spécifique du fluide
g = accélération de la pesanteur
v = vitesse de l'écoulement

La charge a la dimension d'une longueur (énergie/poids ou $F.L.F^{-1}$)

Z représente le terme de position.

$\frac{p}{\rho g}$ représente le terme de pression.

$\frac{v^2}{2g}$ représente le terme cinétique, ou charge due à la vitesse.

4. LES METHODES ET EQUIPEMENTS DE MESURES DES DEBITS

Le choix de la méthode de mesure, et par suite de l'équipement nécessaire, est fonction des facteurs suivants :

- ordre de grandeur du débit de la source
- variabilité du débit
- type de captage réalisé ou possible à réaliser
- précision souhaitée de la mesure
- fréquence souhaitée des mesures (mesure ponctuelle, périodique ou enregistrement continu)
- faisabilité économique

Dans tous les cas la mesure du débit d'une source, comme toute mesure de débit se fait de manière indirecte, c'est à dire par la mesure d'autres grandeurs physiques, et ensuite par calcul ou lecture d'abaques.

Certains équipements de mesure, tels que débitmètres ou compteurs de débit, convertissent automatiquement les grandeurs physiques intermédiaires en une lecture directe du débit, le mécanisme de la mesure reste néanmoins indirect (transformation analogique).

Les grandeurs physiques intermédiaires pouvant être mesurées ou intervenant pour le calcul d'un débit sont :

- les longueurs (distances ou hauteurs d'eau).
- les surfaces
- les volumes
- les temps
- les pressions
- les vitesses

4.1. LES METHODES VOLUMETRIQUES :

Ces méthodes se réfèrent à la définition même du débit $Q=\frac{V}{t}$

Elles consistent en la mesure du volume s'étant écoulé pendant un temps déterminé, ou en la mesure du temps nécessaire au remplissage d'un récipient de capacité connue ou mesurée.

L'erreur relative sur la valeur du débit étant $\frac{dQ}{Q}=\frac{dV}{V}+\frac{dt}{t}$, la précision de la mesure est d'autant meilleure que le temps d'observation est grand. Pour les gros débits cela conduit rapidement à utiliser des récipients de volume considérable.

A titre d'exemple, la mesure d'un débit de 100 m^3/h , à l'aide d'un récipient de 1 m^3, dure 36 secondes.

Une erreur absolue de 0.5 seconde sur la mesure du temps correspond à une erreur relative de 1.39 %. En supposant une erreur relative de 0.5 % sur le volume , la précision sur la mesure du débit sera de l'ordre de 2 %.

Sauf cas spéciaux, ces méthodes conviennent donc plus particulièrement à la mesure des faibles débits, en général inférieurs à 50 ou 100 m^3/h et pour lesquels la précision de la mesure peut atteindre 0.5 à 1 %.

Afin d'augmenter la précision finale on aura toujours intérêt à répéter la mesure plusieurs fois de suite, et à retenir comme valeur la moyenne des mesures.

D'un point de vue pratique ces méthodes peuvent être utilisées, lorsque le captage de la source consiste uniquement en (ou se termine par) une conduite ou un tuyau pouvant se déverser par gravité dans un récipient ou réservoir de mesure.

Sur les conduites fermées (cas fréquents des captages d'exploitation) une méthode de même principe peut s'employer si un compteur d'eau volumétrique (totalisateur) a été installé sur la conduite . Il suffit évidemment d'effectuer deux lectures du compteur espacées d'un temps mesuré.

4.2. AUTRES METHODES DE MESURE EN SORTIE DE CONDUITES

Ce sont des méthodes généralement employées pour la mesure des débits des forages d'eau, mais elles peuvent être également utilisées pour mesurer le débit d'une source lorsque le système de captage permet le branchement d'une conduite circulaire sur l'exhaure.

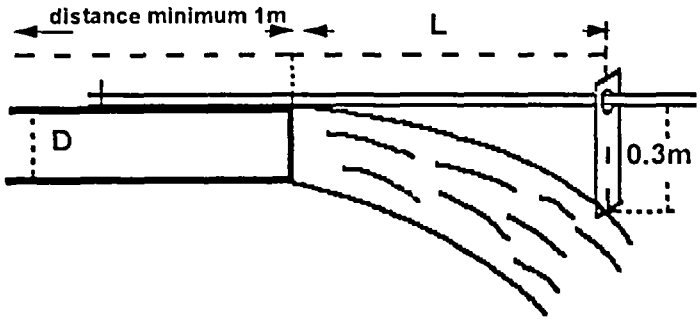
4.2.1. METHODES D'EVALUATION RAPIDE

Ces méthodes sont peu précises, mais elles permettent une évaluation rapide et ceci avec un équipement très simple.

Elles reposent sur le principe que la longueur du jet d'eau jaillissant d'une conduite horizontale est proportionnel au débit.

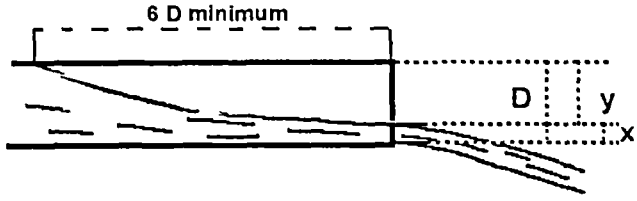
Dans le cas d'une conduite verticale, la hauteur du jet est également une fonction du débit.

Les schémas des dispositifs de mesure, ainsi que les formules correspondantes, sont donnés ci-après :



Conduite pleine

$$Q = 3.9 \cdot L \cdot \sqrt{\Pi \frac{D^2}{4}}$$

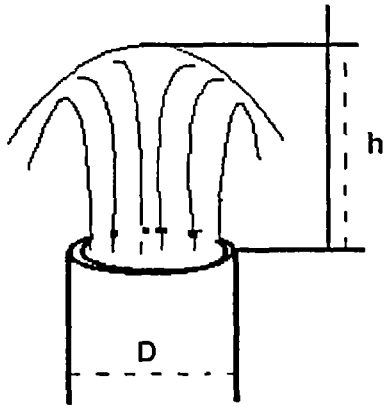


Conduite partiellement remplie

$$Q = \frac{x}{D} \cdot 3.9 \cdot L \cdot \sqrt{\Pi \frac{D^2}{4}}$$

Les débits sont en m3/s et les longueurs en mètres

Mesure d'un débit artésien



si $h \leq 0.37\ D$ $\quad Q = 5.47\ D^{1.25} \cdot h^{1.35}$

si $h \geq 1.4\ D$ $\quad Q = 3.15\ D^{1.99} \cdot h^{0.53}$

si $0.37\ D \leq h \leq 1.4 D$
Q est légérement inférieur à celui donné par les formules précédentes

les débits sont en m3/s et les longueurs en mètres

4.2.2. METHODE DU DIAPHRAGME

C'est une des méthodes les plus couramment employées pour la mesure des débits lors de la réalisation de pompages d'essai. Elle est souvent appelée (improprement) méthode du tube de Pitot.

Elle est basée sur le fait que la pression d'eau à l'intérieur d'une conduite circulaire à orifice diaphragmé est fonction du débit, et des diamètres de la conduite et du diaphragme.

Equipement :

On branche sur la conduite de sortie du captage un tube rectiligne de diamètre connu D, de longueur minimale 15 D et se terminant par un orifice diaphragmé de diamètre d . A une distance de 5 D de l'orifice le tube doit être muni d'une prise de pression latérale (cf. schéma page 16) reliée à un tube manométrique gradué.

L'ouverture du diaphragme doit être parfaitement circulaire et à arête vive. Le tube horizontal doit être entièrement plein d'eau et la pression suffisante pour que le jet ne soit pas dispersé.

Les dimensions et l'exécution de l'équipement sont définis par la norme AFNOR NF X 10102 (juin 1971).

d'après l'équation de Bernoulli le débit est donné par la relation $Q = K\, s \sqrt{2gh}$
avec s surface de l'orifice

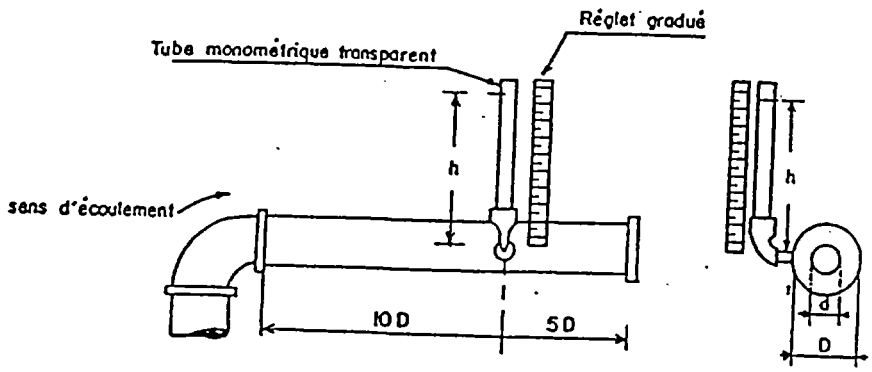
qui peut se résumer $Q = C\, d^2 \sqrt{h}$

Le coefficient C est fonction du rapport $\frac{d}{D}$ Des tables donnent directement la valeur du débit en fonction des diamètres du tube et du diaphragme (cf. page 17).

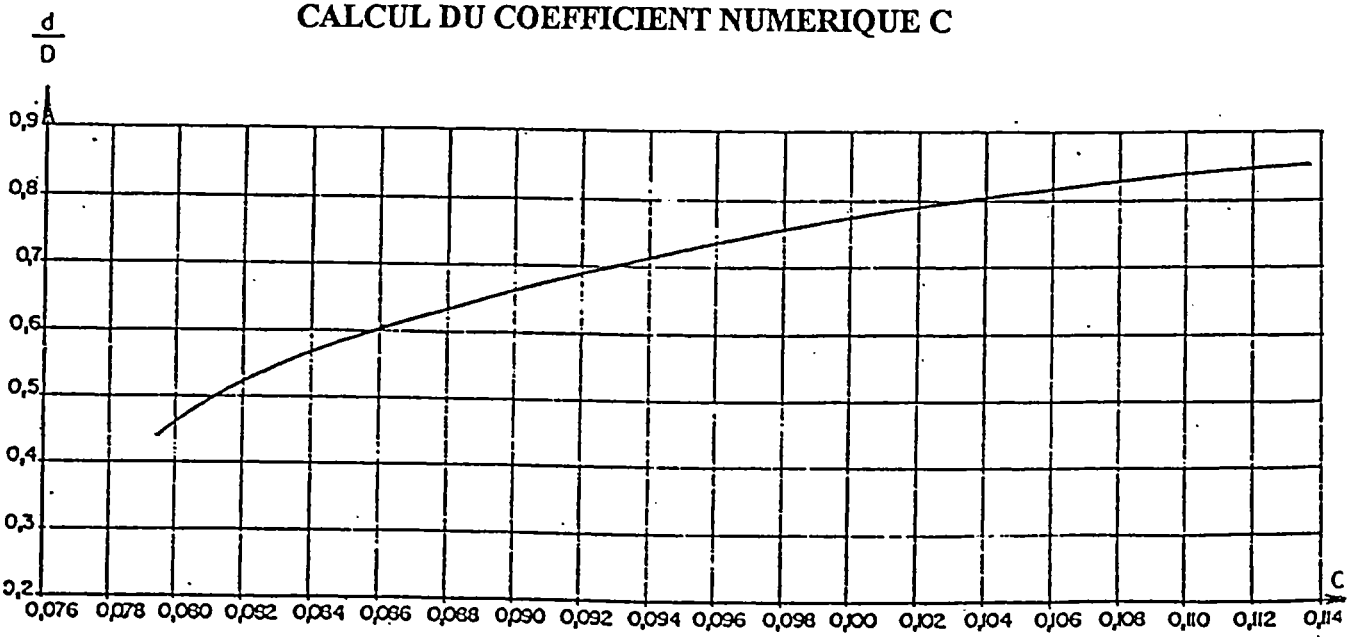
Cette méthode permet de mesurer des débits compris entre quelques mètres cubes et environ 300 m^3/h, avec des tubes de 2 à 8 pouces.

Si les débits de la source sont très variables (rapport > 4) il est nécessaire de disposer d'un jeu de plusieurs tubes diaphragmés.

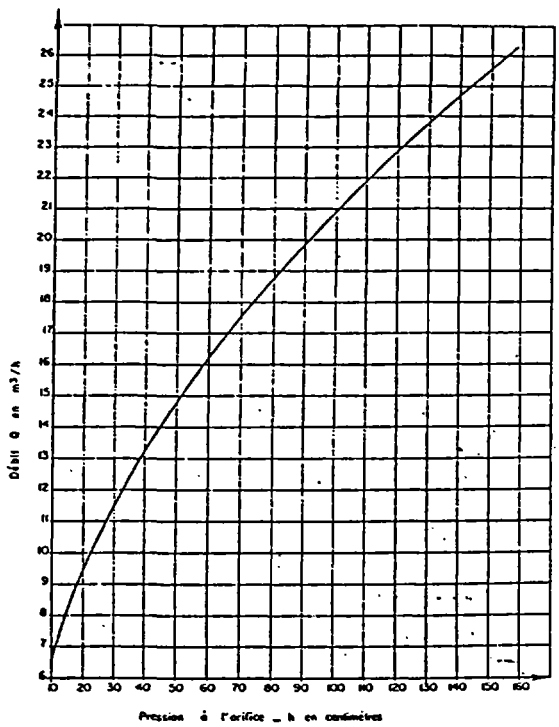
SCHEMA D'INSTALLATION D'UN TUBE DIAPHRAGME



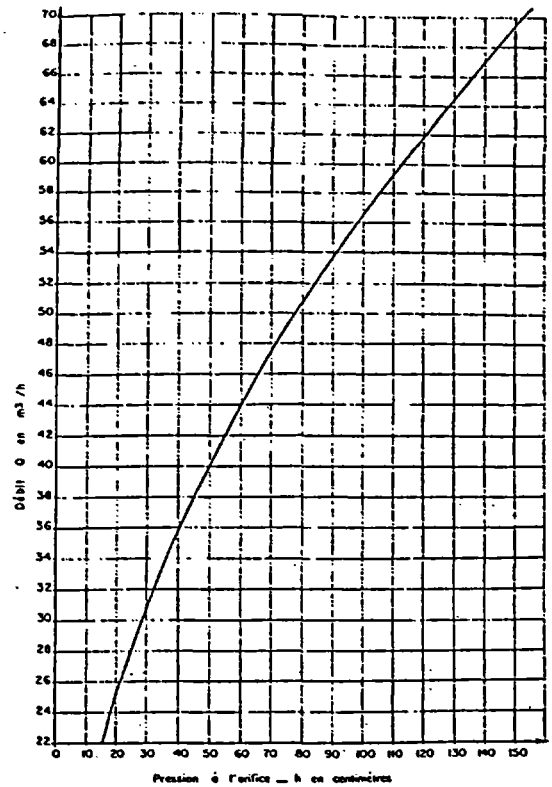
CALCUL DU COEFFICIENT NUMERIQUE C



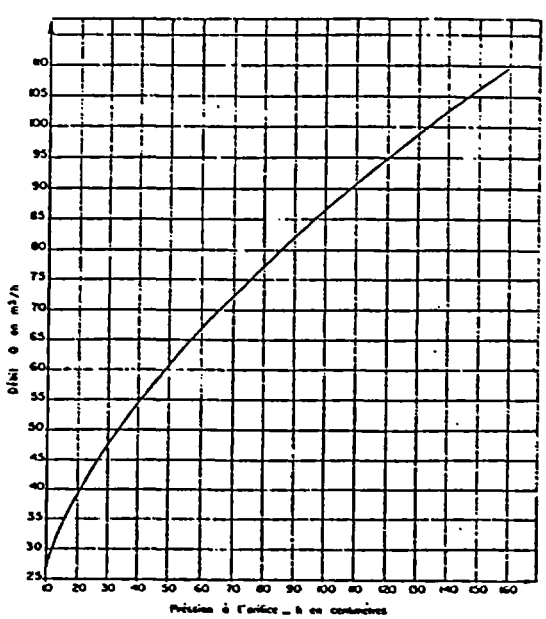
ORIFICE 2 POUCES TUBE 4 POUCES



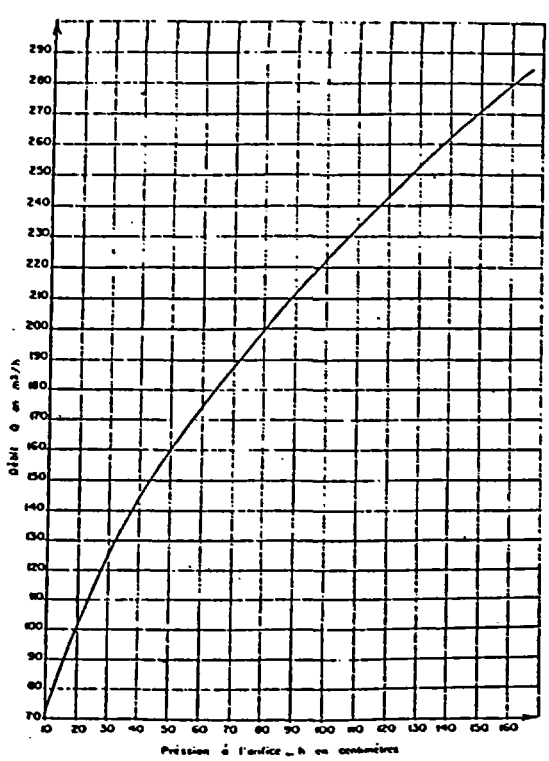
ORIFICE 3 POUCES TUBE 4 POUCES



ORIFICE 4 POUCES TUBE 7 POUCES



ORIFICE 6 POUCES TUBE 8 POUCES



COURBES DEBIT/ PRESSION POUR DIFFERENTS TUBES DIAPHRAGMES

4.2.3. LES DANAÏDES

Principe : Le débit s'écoulant par l'orifice de fond d'un réservoir est également lié à la charge d'eau dans le réservoir par la relation

$$Q = K\,s\,\sqrt{2gh}$$

dérivée de l'équation de Bernoulli
avec s section de l'orifice et h charge d'eau dans le réservoir

Si ce réservoir est alimenté par un débit Q, la charge se stabilisera donc à une valeur h donnée par cette relation et telle que le débit d'alimentation soit égal au débit de l'exutoire. Autrement dit la mesure de la hauteur d'eau dans le réservoir permet de mesurer le débit d'alimentation.

De tels dispositifs ont été appelés danaïdes (par référence à la notion de tonneaux percés de la fameuse légende grecque).

Le coefficient k dépend de la nature et des caractéristiques de l'orifice (qui peut être un diaphragme, ou tout autre dispositif d'étranglement).

Les orifices peuvent être multiples, mais dans ce cas de même nature et disposés de manière régulière et concentrique autour de l'axe vertical du réservoir (danaïdes multiples).

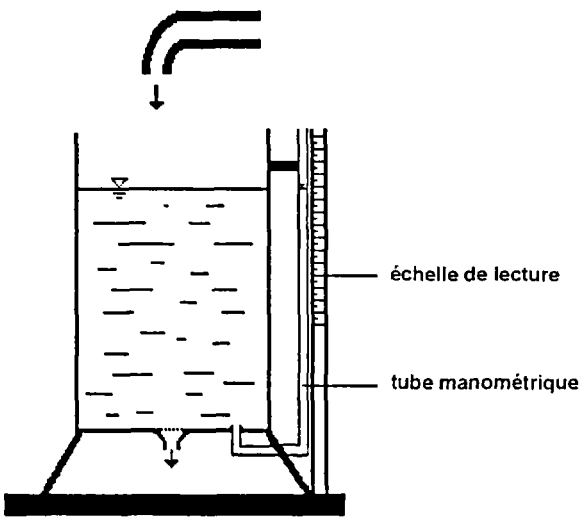
Les réservoirs des danaïdes peuvent être de forme cylindriques ou parallélépipédiques.

L'indicateur de niveau est généralement un tube en verre muni de graduations, et peut être muni d'un dispositif d'enregistrement pour les mesures en continu.

Afin d'augmenter la précision pour un même débit, la charge d'eau doit être la plus haute possible, d'où l'intérêt pour les danaïdes multiples de pouvoir obturer une partie des orifices pour la mesure des faibles débits.

La détermination du coefficient k se fait par étalonnage de l'appareillage.

Les danaïdes doivent être également munies d'un dispositif pour éliminer ou limiter le phénomène de turbulence dû au jet de l'alimentation (flotteur en bois et grilles).



4.3. MESURES SUR CONDUITES FORCEES

Ce sont généralement les méthodes utilisées lorsque le captage de la source a été réalisé dans un but d'exploitation et que le transfert d'eau se fait totalement sous conduites forcées.

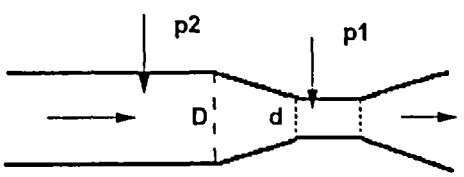
4.3.1 METHODES BASEES SUR LES MESURES DIFFERENTIELLES DE PRESSION

4.3.1.1 SYSTEMES DEPRIMOGENES

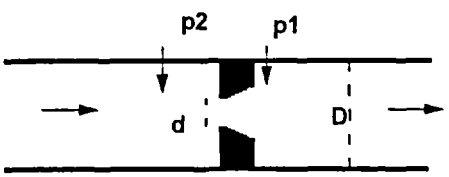
Ces systèmes, encore appelés à étranglement, permettent le calcul du débit dans une conduite par la mesure de la chute de pression provoquée par une réduction de sa section.

Les principaux dispositifs utilisés sont les suivants :

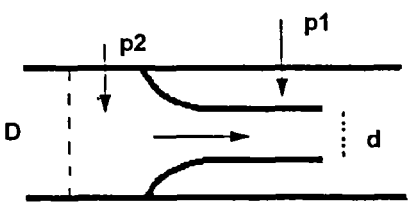
Les pressions sont mesurées en p2 et p1



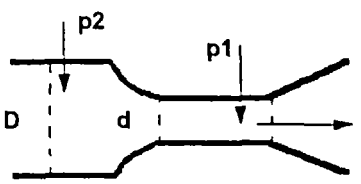
LES TUBES VENTURI



LES DIAPHRAGMES



LES TUYERES



LES VENTURI - TUYERES

Dans ces différents dispositifs, le principe de la méthode est que le débit est lié à la chute de pression créée par la relation

$$Q = K\,d\,\sqrt{2g(p2-p1)}$$

(déduite de l'équation de Bernoulli)

Les mesures sont généralement faites au moyen d'un manomètre différentiel (qui peut être un simple tube en U rempli de mercure)

La précision sur la mesure du débit est comprise entre 0.5 et 2 % .

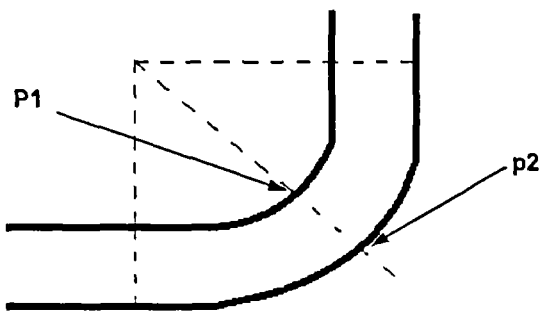
Les coefficients K sont différents suivants les dispositifs, leur forme et leurs dimensions.

Il existe plusieurs types normalisés de ces différents dispositifs, pour lesquels les coefficients sont déterminés par tarage sur bancs d'essais.

4.3.1.2. MESURES DE PRESSION DIFFERENTIELLE SUR LES COUDES DE CONDUITES

Principe : dans l'écoulement d'un fluide à travers une section coudée de conduite, il se produit une dépression entre la partie interne et la partie externe du coude.

Schéma :



les pressions sont mesurées sur la bissectrice de l'angle.

le débit est donné par la formule $Q = k\ S\ \sqrt{2g(p2-p1)}$ comme pour les systèmes déprimogènes.

le coefficient k dépend du rapport du rayon du coude au diamètre de la conduite $\frac{r}{d}$

r./d	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.25	2.5	2.75	3.0
k	0.701	0.767	0.849	0.924	0.992	1.051	1.112	1.163	1.224

La mesure de p2 - p1 est également effectuée à l'aide d'un manomètre différentiel.

Remarque 1 : Les manomètres différentiels utilisés sur des systèmes déprimogènes peuvent être munis de dispositif à extraction de racine et indiquer ainsi directement sur un cadran la valeur du débit instantané (ceci évidemment en tenant compte du coefficient de proportionnalité propre au

système). L'ensemble de l'appareillage est alors un des types de compteurs de débit, appelés débitmètres à étranglement.

Remarque 2 : Les différents types de systèmes déprimogènes peuvent également être installés en sortie de conduites (cf. chap. 4.2.2, méthode du diaphragme). Dans ce cas la mesure de la différence de pression p2 - p1 est remplacée par la seule mesure de pression en amont du dispositif d'étranglement.

4.3.2. METHODES BASEES SUR LES MESURES DE VITESSE

Principe : $Q = v \cdot S$

Le débit est le produit de la section de la conduite par la vitesse moyenne de l'écoulement.

Les appareils de mesure sont dans ce cas des compteurs mesurant la vitesse de l'écoulement par l'intermédiaire d'un système rotatif pouvant être :

- à ailettes
- à hélice
- à turbine

Ces compteurs sont intercalés entre deux éléments de la conduite. Certains types mesurent les vitesses sur la totalité du flux circulant dans la conduite et les traversant. D'autres types comportent une conduite de dérivation et mesurent les vitesses sur cette conduite (le débit dans la dérivation étant proportionnel au débit total).

Certains compteurs appelés compteurs couplés ou compteurs combinés (ils sont branchés en série ou en parallèle) peuvent mesurer sur une même conduite des gammes de débits différents.

Ces compteurs sont directement gradués en valeur de débits, et sont appelés compteurs de débits par opposition aux compteurs de volume.
La précision sur les débits mesurés varie suivant les types et le débit nominal entre 2 et 5 %.

Parmi les autres types de compteurs de débits utilisables sur des conduites forcées, on peut citer également les débitmètres à flotteurs (gyromètres), les débitmètres électromagnétiques, les débitmètres électroniques à rotor et les débitmètres à ultrasons.

4.4. METHODES DE MESURE POUR LES ECOULEMENTS A SURFACE LIBRE

Dans le cas de l'écoulement naturel d'une source, ou lorsque son dispositif de captage se fait, ou est rapporté au contact de la pression atmosphérique, les méthodes employées pour la mesure de son débit, sont les mêmes que celles utilisées pour le jaugeage des canaux ou des cours d'eau.
Dans ce cas les principales méthodes sont les suivantes :

4.4.1. MESURES SUR LES SECTIONS NATURELLES D'ECOULEMENT

Lorsque la source s'écoule dans un chenal naturel avec un débit important et qu'aucun dispositif particulier de jaugeage n'a été installé, on peut avoir recours à des méthodes employées pour le jaugeage des rivières et basées sur la relation : Débit = section x vitesse moyenne.

La vitesse moyenne peut être déterminée par les procédés classiques : flotteurs, moulinets, capteurs ultrasons (cf. chap. 4.4.5) ou calculée par des formules d'écoulement telles que la formule de Manning-Strickler ou la formule de Chézy :

formule de Manning-Strickler : $v = K \cdot i^{1/2} \cdot R^{2/3}$

formule de Chézy : $v = c \cdot \sqrt{R.i}$

avec v = vitesse moyenne de l'écoulement
i = pente de la ligne d'eau (dH/ L)
R = rayon hydraulique à la station de mesure = section mouillée / périmètre mouillé

K et c sont des coefficients de rugosité (valeurs données par des tables).

La station de mesure devra être choisie sur une partie du chenal rectiligne, et de section et de pente aussi régulière que possible.

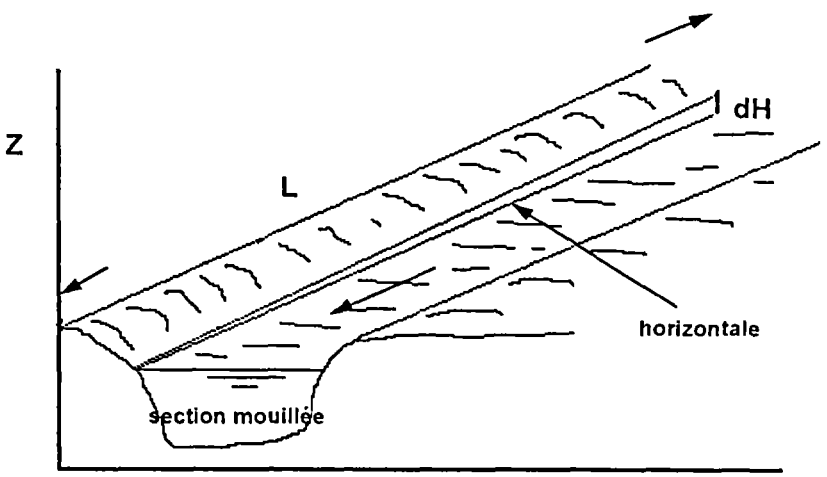
La pente de la ligne d'eau sera déterminée sur un profil longitudinal de part et d'autre de la station et aussi long que possible (à l'aide de deux limnimètres distants de L).

Si la vitesse moyenne est déterminée par jaugeages, le calcul de la pente de la ligne d'eau n'est pas nécessaire, on pourra néanmoins l'effectuer et comparer les valeurs de vitesse obtenues par jaugeage et par application des formules.

Le problème de ces méthodes réside dans la détermination de la section mouillée. Le profil topographique en travers n'est en effet possible qu'avant ou après l'écoulement (sauf si l'on peut réaliser un sondage avec une méthode assez précise). Par ailleurs les flancs et le fond de la section peuvent se modifier au cours du temps.

En pratique la précision de ces méthodes gagnera beaucoup si un aménagement (même sommaire) du chenal est possible sur une certaine longueur (section géométrique simplifiée, et bétonnage ou cimentation) de manière à assurer la constance de la section et de ramener le calcul de la section mouillée et du rayon hydraulique à la seule mesure de la hauteur. Cela revient à construire et à utiliser des courbes S = f (h) et R = f (h).

SCHEMA



4.4.2. LES DEVERSOIRS

Les déversoirs sont de très anciens équipements de mesure des débits pour les écoulements à surface libre.

La partie principale d'un déversoir est une paroi verticale, également appelée seuil, placée perpendiculairement à l'axe de l'écoulement et destiné à surélever sa surface libre.

La hauteur de charge h ainsi créée est une fonction du débit qui est variable suivants les caractéristiques du déversoir.

Il existe de nombreux types de déversoirs classés selon les critères suivants :

- épaisseur de la paroi :
  déversoirs à paroi mince
  déversoirs à paroi épaisse (ou seuil épais)

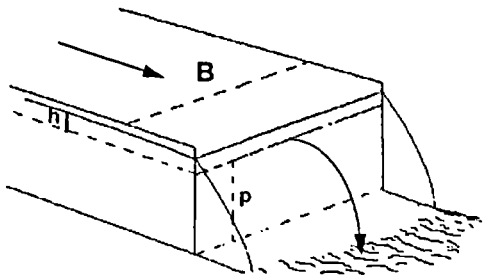
- géométrie de l'échancrure :
  déversoirs rectangulaires (avec ou sans contraction latérale)
  " triangulaires
  " trapézoïdaux
  " circulaires
  " à échancrure courbe ou complexe (déversoirs à loi exponentielle, ou linéaire)

Déversoirs rectangulaires à paroi mince

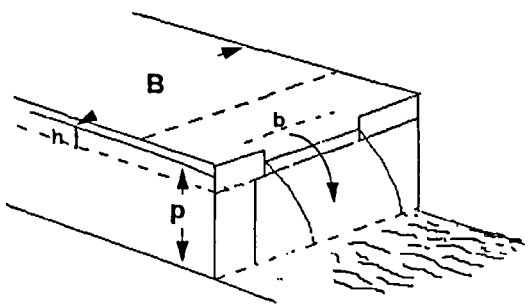
Ce sont les types de déversoirs les plus utilisés.

Schémas :

Déversoir sans contraction latérale



Déversoir à contraction latérale



On distingue :

Les déversoirs sans contraction latérale :

pour lesquels la largeur de la paroi déversante est égale à la largeur du canal d'amenée

des déversoirs à contraction latérale :

pour lesquels la largeur de la paroi déversante est inférieure à la largeur du canal d'amenée

Définition des termes :

p = hauteur de la paroi déversante, appelée hauteur de pelle.
b = largeur de la paroi déversante.
B= largeur du canal d'amenée.
h = charge d'eau au dessus de l'arête de la paroi, mesurée avant le fléchissement de la surface libre de l'écoulement à l'approche de la paroi.
l = distance du point de mesure de la charge à la paroi.
L= longueur totale du canal d'amenée.

Conditions générales d'exécution :

Le canal d'amenée doit être rectiligne, à fond horizontal, à parois latérales verticales et parallèles et suffisamment long (en général $L \geq 10\ B$) pour assurer l'uniformité de l'écoulement (répartition symétrique des vitesses par rapport au plan vertical axial du canal). Afin de limiter les turbulences de l'écoulement, si besoin est ,on placera à l'entrée du canal une grille stabilisatrice.

La paroi déversante doit être verticale, perpendiculaire à l'axe de l'écoulement et suffisamment rigide.

La crête de la paroi doit être horizontale et à arête vive (aiguë).

La hauteur de pelle doit être suffisante pour que la lame d'eau déversée n'adhère pas à la face aval de la paroi;

Dans le cas de déversoirs sans contraction latérale on assurera l'aération de la lame déversante par la construction de puits ou prise d'aération sur les flancs du déversoir.

Les murs latéraux du déversoir doivent être prolongés en aval de la paroi d'au moins un tiers de la valeur de la charge maximale.

L'emplacement de mesure de la charge doit être situé en amont de la paroi, à une distance l de 3 à 4 fois supérieure à la charge maximale.

La mesure de la charge doit être effectuée en retrait de la section d'écoulement, dans une encoche du mur latéral ou dans un puits à l'intérieur de ce mur. Elle pourra être effectuée au moyen d'un limnigraphe, ou d'un capteur de pression. On installera également une échelle limnimétrique de contrôle.

Calcul des débits

Il existe de nombreuses formules calculant le débit des déversoirs rectangulaires, chacune correspondant à des conditions d'application spécifiques. Nous ne mentionnerons ici que les plus courantes.

Formule de Hegly - Bazin :

$$Q = \left(0.45 + \frac{0.0027}{h} - 0.03\,\frac{B-b}{B}\right)\left[1+0.55\left(\frac{b.h}{B(h+p)}\right)\right] b.\sqrt{2g.h^{3/2}}$$

avec Q en m^3 / s, et b, B, p, h en m

Conditions d'application spécifique :

sans contraction latérale	**avec contraction latérale**
Bazin	Hegly
b = B	0 < (B-b) / B < 0.9 m
0.08 < h < 0.70 m	0.1 < h < 0.6 m
B > 4 h	0.4 < B < 1.8 m
0.2 < p < 2.0 m	0.4 < p < 0.8 m

Formule de Rehbock :

déversoir sans contraction latérale

$$Q=\frac{2}{3}\left(0.6035 + 0.0813\,\frac{h}{p}\right)\sqrt{2g}.b.h_e^{3/2}$$

avec $h_e = h + 0.0012$
Q en m^3/s
h, h_e , p ,b en m

conditions d'application spécifique :

$h / p \leq 1.0$

$0.03 < h < 0.75$ m

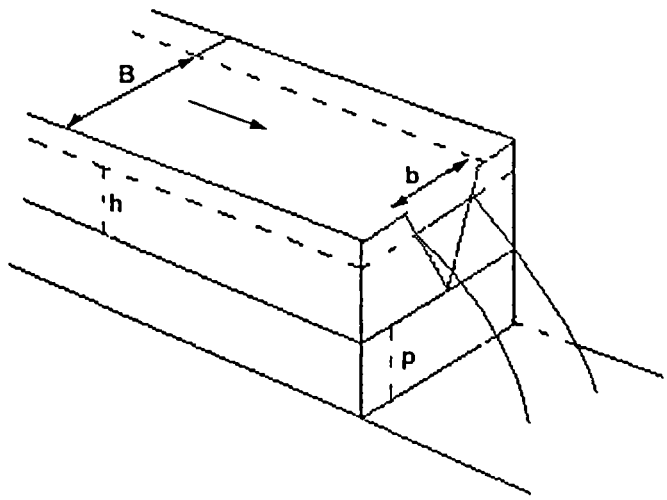
$b \geq 0.30$ m

$p \geq 0.10$ m

Déversoirs triangulaires

Ils constituent le second type de déversoirs couramment employés. L'échancrure de la lame déversante est de forme triangulaire, la pointe tournée vers le bas. L'angle d'ouverture est généralement compris entre 20 et 120 degrés, le plus couramment de 90 degrés.

Le relèvement de la surface libre de l'écoulement étant plus important que pour les déversoirs rectangulaires ils sont employés pour des gammes de débit plus faibles.



Comme pour les déversoirs rectangulaires. les formules de calcul les plus couramment utilisées correspondent à des types standardisés. Ce sont :

Formule de Gourley et Crimp :

$Q = 1.32.\ tg\frac{\alpha}{2}.h^{2.47}$ α étant l'angle d'ouverture

ainsi pour $\alpha = 120°$ $Q = 1.73\ h^{2.47}$
pour $\alpha = 90°$ $Q = 1.32\ h^{2.47}$
pour $\alpha = 60°$ $Q = 0.76\ h^{2.47}$
pour $\alpha = 45°$ $Q = 0.55\ h^{2.47}$

condition d'application : la largeur du canal d'amenée doit être au moins égale à 2.5 fois la largeur de la lame déversante.

Formule de Kindsvater - Shen

$Q = C \cdot \frac{8}{15}\sqrt{2g}.tg\frac{\alpha}{2}.h_e^{5/2}$ avec Q en m^3/s et h_e en m

$h_e = h + k_e$ k_e est un coefficient qui tient compte de la tension superficielle . Pour $\alpha = 90°$ $k_e = 0.85$ mm
h est la hauteur de lame mesurée
$C = f(h/p , p/B , \alpha)$ avec B largeur du chenal amont

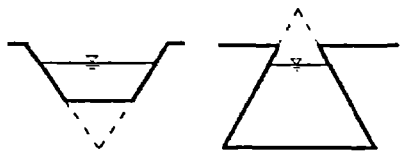
pour les déversoirs standardisés suivants :

avec un angle $\alpha = 90°$ $tg\,\alpha/2 = 1$ $Q = C \cdot 8/15\sqrt{2g}\ h_e^{5/2}$
$\alpha = 53°8$ $tg\,\alpha/2 = 0.5$ $Q = C \cdot 4/15\sqrt{2g}\ h_e^{5/2}$
$\alpha = 28°4$ $tg\,\alpha/2 = 0.25$ $Q = C \cdot 2/15\sqrt{2g}\ h_e^{5/2}$

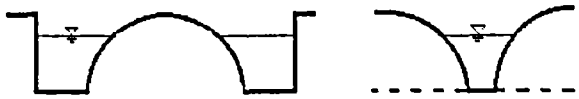
Autres types de déversoirs à paroi mince

Nous ne les mentionneront que pour mémoire car ils sont très peu employés
Il s'agit des déversoirs à ouvertures trapézoïdales, semi-circulaires ou à courbure calculée de manière à ce que la relation $Q = f(h)$ soit exponentielle ou linéaire.

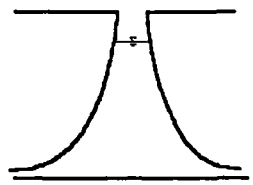
Déversoirs à ouverture trapézoïdale



Déversoirs à ouverture circulaire



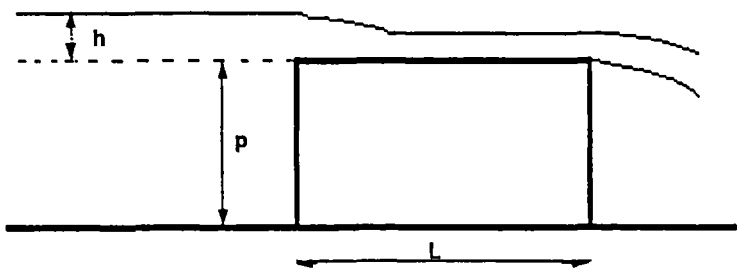
Déversoir à loi linéaire



Pour le déversoir à loi linéaire la courbe de l'échancrure est calculée de telle manière que le débit varie linéairement avec la charge d'eau.

Déversoirs à seuil épais

Pour les gros débits, analogues à ceux des canaux et rivières, on peut utiliser des déversoirs à seuil épais, c'est à dire généralement compris entre 0.15 et 4 mètres.
Les types les plus utilisés sont à ouverture rectangulaire.



Dans ce cas le débit (en m^3/s) est calculé par la formule : $Q = k \cdot B \cdot h^{3/2}$

avec :

B = largeur du déversoir (en m)
h = charge (en m) au dessus du niveau du seuil et mesurée en amont à une distance au moins 2.5 h
k est un coefficient de débit compris entre 1.3 et 2 et donné par la table suivante en fonction de la longueur du seuil et de la charge.

CHARGE h en m	LONGUEUR DU SEUIL EN m										
	0,15	0,225	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,20	1,50	3,00	4,50
0,06	1,54	1,52	1,48	1,44	1,40	1,37	1,35	1,31	1,29	1,37	1,48
0,12	1,61	1,54	1,50	1,46	1,44	1,43	1,42	1,40	1,38	1,41	1,49
0,18	1,70	1,59	1,52	1,46	1,44	1,43	1,48	1,48	1,49	1,49	1,49
0,24	1,82	1,68	1,57	1,48	1,43	1,43	1,47	1,48	1,48	1,48	1,46
0,30	1,83	1,73	1,64	1,52	1,47	1,46	1,46	1,47	1,48	1,48	1,46
0,36	1,83	1,76	1,70	1,58	1,49	1,46	1,46	1,47	1,47	1,48	1,46
0,42	1,83	1,80	1,76	1,61	1,53	1,48	1,46	1,46	1,46	1,47	1,46
0,48	1,83	1,81	1,81	1,69	1,59	1,52	1,48	1,47	1,46	1,46	1,45
0,54	1,83	1,83	1,83	1,69	1,59	1,51	1,48	1,47	1,46	1,46	1,45
0,60	1,83	1,83	1,83	1,67	1,57	1,52	1,50	1,48	1,46	1,46	1,45
0,75	1,83	1,83	1,83	1,81	1,69	1,59	1,55	1,50	1,47	1,46	1,45
0,90	1,83	1,83	1,83	1,83	1,76	1,68	1,61	1,51	1,47	1,46	1,45
1,05	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,76	1,64	1,52	1,48	1,46	1,45
1,20	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,69	1,54	1,48	1,46	1,45
1,35	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,59	1,51	1,46	1,45
1,50	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,69	1,54	1,46	1,45
1,65	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,59	1,46	1,45

Remarque :
La formule précédente est tirée de la formule $Q = K \cdot B \cdot h^{3/2} \cdot \sqrt{2g}$
les coefficients de débits sont quelquefois exprimés par le facteur K
la relation entre ces 2 facteurs est évidemment $k = K \cdot \sqrt{2g}$

4.4.3. LES SEUILS OU CANAUX JAUGEURS

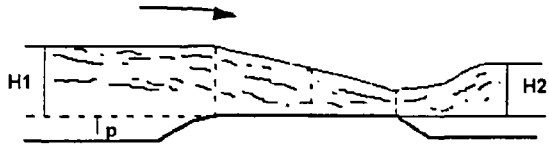
Les seuils jaugeurs, également appelés canaux jaugeurs, peuvent être considérés comme des types particuliers de déversoirs à seuil épais. Ils sont cependant caractérisés par le fait que le rétrécissement de la section d'écoulement (verticalement, ou horizontalement, ou dans les deux directions) est réalisée de manière progressive, et non pas brusquement comme dans les déversoirs. Ils présentent de ce fait le gros avantage sur les déversoirs, qu'ils suppriment (ou au moins limitent, ceci suivant la hauteur et l'angle amont du seuil) la possibilité de sédimentation en amont, qui faussent les mesures dans le cas des déversoirs. Leur utilisation se fera donc en particulier pour des écoulements chargés en matières solides.

Il existe plusieurs types de seuils ou canaux jaugeurs. Ils sont normalisés suivant les formes et les dimensions du seuil et de la contraction latérale. Les principaux sont les canaux Venturi, les seuils Parshall, les seuils Neyrpic.

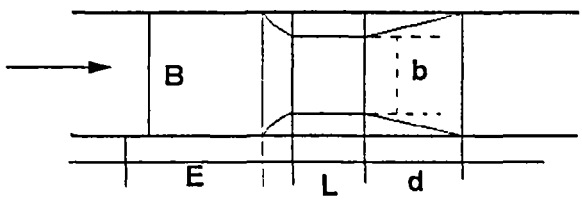
D'un point de vue pratique, pour les faibles débits ils peuvent être construits en matériau métallique, pour les forts débits ils seront généralement construits en maçonnerie ou en béton.

Canal Venturi

Profil longitudinal



Vue de dessus



Le canal Venturi est un dispositif à contraction latérale et rehaussement du fond qui provoque un ressaut traduisant le passage du régime fluvial au régime torrentiel.

notation des schémas :

B largeur du canal d'approche
b largeur de la section contractée
d longueur de la section divergente
E distance entre le point de mesure de la charge et le début de la contraction
L longueur de la section contractée
p hauteur de pelle (rehaussement du fond)

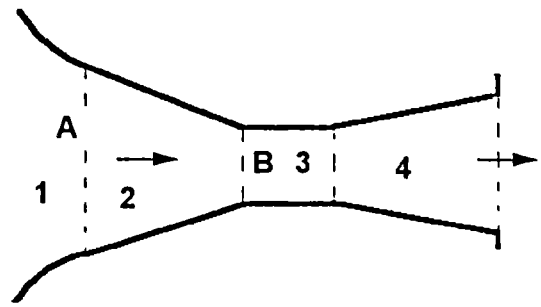
conditions de validité :
H1 maximum = 1.3 x B
la perte de charge H1- H2 doit être au minimum 0.25 x H1 pour que le débit soit une fonction univoque de la charge amont H1.

Les courbes Q = f (H1) correspondent à des dispositifs normalisés.

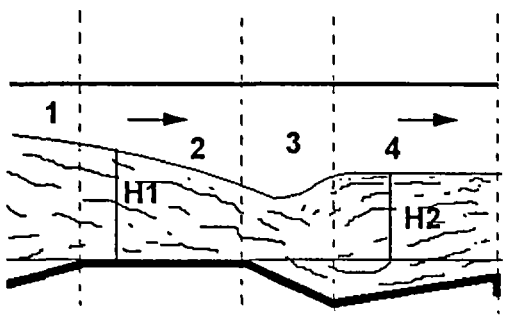
Les canaux Venturi peuvent être préfabriqués comme par exemple ceux proposés par TECHNIFLOW , soit en moulage de résine de polyester armée de fibres de verres (plusieurs modèles pour des débits compris entre 0.18 m^3/h et 14400 m^3/h), soit métalliques (plusieurs modèles pour des débits compris entre 796 m^3/h et 43200 m^3/h).

Les courbes Q = f (H) sont fournies avec chaque modèle.

Seuil jaugeur Parshall



Vue de dessus



Profil longitudinal

Le seuil jaugeur Parshall se compose de quatre parties :

1. entonnoir à fond ascendant
2. section convergente à fond plat
3. section contractée à fond descendant
4. section divergente à fond ascendant

Le débit se calcule en fonction de la différence des charges H1 - H2 mesurées à l'entrée de la section convergente (de surface A) et à la sortie de la section contractée (de surface B) :

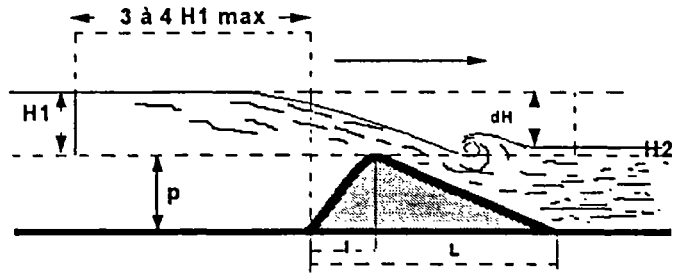
$$\frac{C\,B\sqrt{2\,g\,(H1-H2)}}{\sqrt{1-(\frac{B}{A})^2}}$$

C étant un coefficient compris entre 0.95 et 1 et généralement pris égal à 0.98 si les parois sont bien lisses

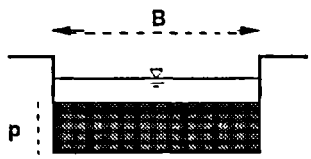
(Custodio E. et Llamas M.R., 1976).

Seuil jaugeur Neyrpic

Le seuil Neyrpic est un dispositif à rehaussement du fond, sans contraction latérale.



Profil longitudinal



Profil transversal

Conditions de validité :

pente du canal amont inférieure à 5%
longueur du canal amont supérieure à 5 fois B
hauteur du canal amont supérieure à 2.8 p (p = hauteur de pelle)
pente amont du seuil : 60°, pente aval du seuil : 12°
H1 maximum égal à 1.4 p
dH doit être supérieur ou égal à à 0.4 H1 pour éviter l'ennoyage

Le débit est donné par la formule $Q = \left[0.41 + 0.10\ (H1/p)\right] H1^{1.5} \sqrt{2g}.B$

avec Q en m^3/s , H1, p et B en mètres.

4.4.4. LES ORIFICES LATERAUX ET VANNES DE FOND

La mesure du débit d'un écoulement de surface peut se faire également à l'aide de parois verticales construites perpendiculairement à l'écoulement, et comportant un orifice ou une vanne de fond.

ORIFICES

Lorsqu'un écoulement de surface est barré par une paroi verticale comportant un orifice, la charge d'eau au dessus de l'orifice se stabilise à une valeur h , fonction du débit de l'écoulement et de la section de l'orifice .

Comme pour les danaïdes (orifice de fond), ces paramètres sont liés par une relation de type

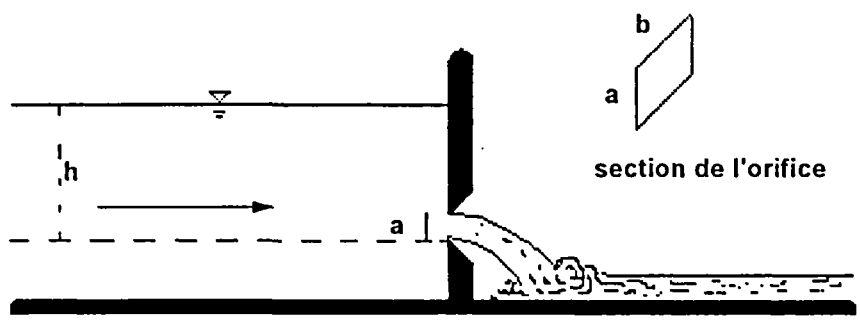
$Q = k\ s\ \sqrt{2gh}$ se déduisant de l'équation de Bernoulli

Si la section de l'orifice est rectangulaire, le débit sera calculé par la formule approchée

$$Q = k\, b \sqrt{2g}\ [h^{3/2} - (h - a)^{3/2}]$$

avec b = largeur de l'orifice
a = hauteur de l'orifice
h = charge d'eau au dessus du niveau inférieur de l'orifice.
k est un coefficient de débit fonction de h et établi par étalonnage.

Schéma du dispositif :

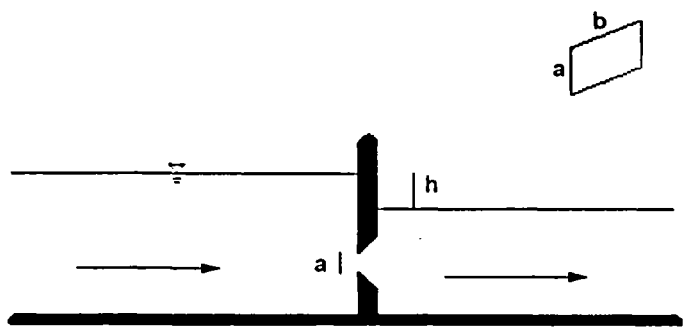


Cas d'un orifice noyé :

Pour une certaine valeur de débit, si l'orifice est placé suffisamment bas le niveau aval de l'écoulement sera au dessus du bord supérieur de l'orifice, l'orifice sera donc entièrement noyé. Dans ce cas le débit sera donné par la formule $Q = k'\, a\, b \sqrt{2gh}$

avec h = différence des niveaux amont et aval
k' est également fonction de h et établi expérimentalement.

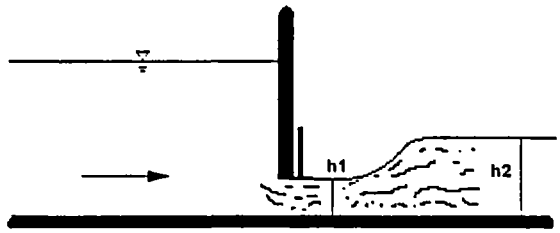
Schéma :



VANNES DE FOND

Une vanne de fond est un dispositif qui permet l'ouverture réglable de la paroi verticale barrant l'écoulement.

Schéma :



Pour un certain débit, lorsque la hauteur d'ouverture de la vanne est suffisamment réduite, l'écoulement devient torrentiel (nombre de Froude = $v^2/gh > 1$) et il se produit un ressaut dans la partie aval de l'écoulement

La mesure des deux niveaux d'eau aval (avant et après le ressaut) permet également le calcul du débit;

La formule employée est $$Q = k\, b \sqrt{2g.h_1.h_2.\frac{h_1+h_2}{2}}$$

b étant la largeur de la vanne de fond
h1 et h2 sont les deux hauteurs d'eau aval et amont
k est un coefficient f (h1,h2) à déterminer expérimentalement.

Conditions d'utilisation de ces méthodes :

L'axe du canal d'écoulement doit être rectiligne sur une longueur dix fois supérieure à la largeur en amont de la paroi, et cinq fois supérieure à la largeur en aval de la paroi.

La section doit être constante sur tout ce tronçon rectiligne.

L'orifice doit être centré par rapport à l'axe du canal. Les orifices peuvent être multiples. dans ce cas ils doivent être tous à même hauteur et symétriques par rapport à l'axe du canal.

Les courbes ou tableaux des valeurs des différents coefficients k doivent être établis sur la station elle-même par des mesures d'étalonnage au moulinet (cf. chap. 4.4.6.).

4.4.5. LES MESURES DE HAUTEURS D'EAU

Mis à part les méthodes volumétriques ou les lectures de compteurs de débit, les mesures de débits passent toujours par des mesures intermédiaires de hauteur d'eau (ou de pression).

Rappel : Conversion hauteur d'eau-pression :

Une hauteur d'eau de 1 mètre au dessus d'un point, équivaut à une pression hydrostatique en ce point de 0.1 kgf /cm^2 (le poids spécifique de l'eau à la température de 4 degrés et à la pression atmosphérique normale de 760 mm de mercure est approché à 1 kgf /dm^3). La pression hydrostatique exprimée en hauteur d'eau est encore appelée charge d'eau.

Les mesures de hauteur d'eau (limnimètrie) peuvent être par conséquent des mesures de grandeurs linéaires ou des mesures de pression.

Les différents équipements permettant ces mesures sont :

Les échelles limnimétriques :

Elles permettent des lectures ponctuelles dans le temps. Ce sont de simples barres, le plus souvent métalliques (en fonte ou tôle d'acier),et munies d'une graduation permettant la lecture de leur niveau d'immersion.

Elles sont installées à poste fixe, sur le bord d'un cours d'eau, ou contre les parois latérales d'un canal, ou encore à l'intérieur d'un puits en communication hydraulique directe avec le plan d'eau à mesurer.

Le point zéro de l'échelle peut correspondre au radier de l'écoulement ou à un autre niveau de référence.

On emploie généralement des échelles verticales, mais lorsque l'installation est possible, l'utilisation d'une échelle inclinée augmentera la précision de lecture sur les hauteurs.

La précision de lecture est très variable suivant l'état du plan d'eau, mais l'erreur est rarement inférieure à 1 ou 0.5 cm.

L'installation dans un puits est souhaitable pour supprimer ou limiter les fluctuations de surface du plan d'eau.

Les échelles limnimètriques sont fréquemment installées en doublure d'un autre dispositif de mesure dans un but de contrôle.

Les perches de sondages

Ce sont des échelles limnimétriques portatives. Elles permettent en particulier dans certains cas de mesurer le fond d'un cours d'eau pour la détermination de la section d'écoulement.

Les sondes à ligne plombée

Ce sont des filins munis d'un plomb et déroulés à l'aide d'un treuil. La vitesse du courant provoquant une courbure du fil, la profondeur se déduit de la longueur de déroulement (lue sur un cadran ou un compteur) après application d'un terme correctif fonction de cette vitesse.

Ces sondes permettent la mesure de profondeurs d'eau plus importantes. non réalisables avec des perches de sondage, mais la précision reste grossière.

Les limnimètres à pointe

Les limnimètres à pointe sont des échelles limnimètriques non immergées pouvant coulisser au dessus du plan d'eau à mesurer. Leur extrémité est munie d'une pointe qui est amenée au contact de la surface de l'eau.

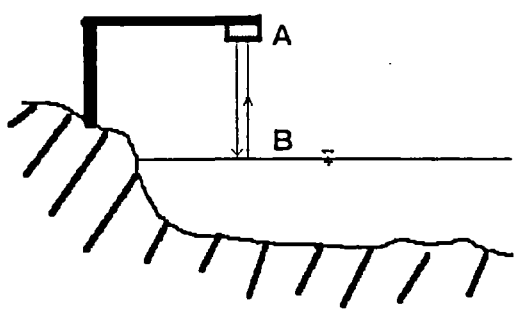
Le coulissage est affiné à l'aide d'une vis micrométrique, soit en descendant (limnimètres à pointe droite) soit en remontant (limnimètres à pointe recourbée) et la lecture faite au vernier.

Certains de ces limnimètres sont en plus munis d'un dispositif de contact électrique à signalisation optique, permettant de mieux apprécier le contact de la pointe avec la surface de l'eau.

La précision de la mesure peut atteindre dans ce cas 0.1 mm.

Les mesures par ultrasons.

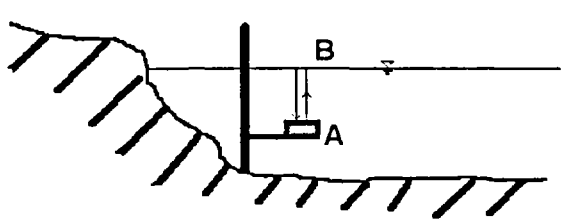
Les mesures de niveau d'eau peuvent être réalisées à l'aide de dispositifs émetteurs-récepteurs d'ultrasons placés au dessus du plan d'eau ou immergés.



Emetteur-récepteur aérien

AB = v.t / 2

v = vitesse du son dans l'air
t = temps aller-retour



Emetteur-récepteur immergé

AB = v.t / 2

v = vitesse du son dans l'eau
t = temps aller-retour

Les limnigraphes

Les limnigraphes sont des appareils de mesure des niveaux d'eau munis d'un dispositif d'enregistrement continu des lectures.

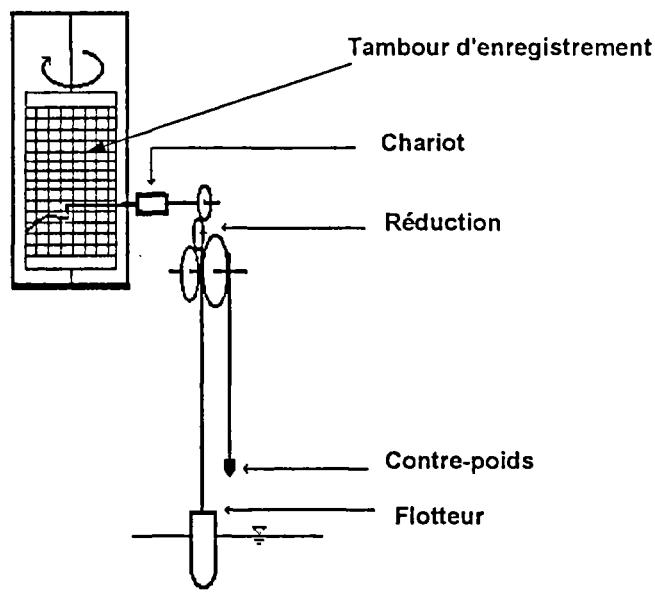
Les plus couramment utilisés sont les limnigraphes à flotteur.

Le déplacement vertical du flotteur entraîne par le système câble-poulie-contrepoids et un système de réduction par roues dentées le déplacement d'un stylet inscripteur sur un cylindre tournant commandé par un mouvement d'horlogerie. Le cylindre (ou tambour) peut être horizontal ou vertical et il est recouvert d'un papier diagramme changeable gradué en temps dans le sens de sa rotation et en échelle de hauteur dans le sens de la génératrice.

Des jeux de roues dentées interchangeables permettent de modifier le rapport de réduction des hauteurs selon l'étendue des variations de niveau à mesurer.

Les limnigraphes à flotteurs sont couramment utilisés pour les mesures sur cours d'eau, canaux, déversoirs et seuils jaugeurs. Le coulissage vertical du flotteur doit toujours se faire à l'intérieur d'un tube de protection.

Leur installation dans un puits ou un tubage en liaison hydraulique avec le plan d'eau à mesurer est toujours à recommander.



Dans certains types de limnigraphes, appelés **codeurs**, la rotation de la poulie est transformée en signal électrique (binaire ou analogique) et enregistré sur un module à mémoire.

Les **limnigraphes pneumatiques** sont des enregistreurs de niveau où le flotteur est remplacé par une tuyauterie immergée (prise de pression) dans laquelle est injectée un débit d'air (bouteille d'air comprimé). La pression dans le tuyau compense la charge d'eau au dessus de la prise de pression et est mesurée par un manomètre à mercure. Un palpeur transmet le déplacement du mercure à la plume de l'enregistreur.

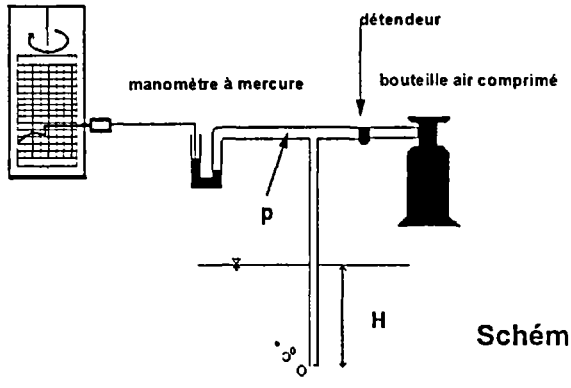


Schéma de principe

Les tubes manométriques.

Ils sont surtout employés pour mesurer les hauteurs d'eau dans les réservoirs.
Les plus simples sont des tubes en verre, gradués et en communication hydraulique avec le réservoir.
La hauteur d'eau est par conséquent la même dans le tube et dans le réservoir.

On utilise également fréquemment des tubes manométriques à mercure, ce qui permet de réduire de 13.6 fois les hauteurs d'eau à lire. Pour des mesures occasionnelles, un type très simple de manomètre à mercure peut être rapidement mis en oeuvre sur le terrain à l'aide d'un tube en U et d'un tuyau de raccord en plastique. Afin d'éliminer les erreurs dues au phénomène de capillarité ,on utilisera des tubes et des tuyaux d'au moins 1 cm de diamètre.

Les capteurs de pression

Les mesures de hauteurs d'eau sont à l'heure actuelle de plus en plus effectuées à l'aide de capteurs de pression à enregistrement de signaux électriques.

Il en existe quatre types principaux :

- les capteurs **piézo-résistifs**. La déformation d'une membrane délivre une tension bas niveau qui est convertie en signal d'intensité électrique.
- les capteurs **piézo-capacitifs**. La déformation de la membrane induit une variation de capacité électrique.
- les capteurs à **corde vibrante**. On mesure la variation de fréquence de résonance d'une corde à piano reliée à la membrane.
- les capteurs **micro bulle à bulle**. Seule la prise de pression proprement dite est immergée. La pression de l'eau est compensée par une pression d'air qui est mesurée par le capteur placé à l'intérieur de la centrale.

Ces capteurs sont reliés par câble à un module d'acquisition de données, soit avec enregistrement sur cartouche, soit à lecture par micro-ordinateur de terrain.

Certains modules d'acquisition de données peuvent être également équipés d'un dispositif de transfert des données à distance, soit par modem (France Telecom), soit par satellites

Certains capteurs de pression enregistrent simultanément d'autres paramètres, en particulier la température ou la conductivité.

De nombreux équipements de ce type existent sur le marché. Nous en citerons quelques uns parmi les plus utilisés en hydrométrie :

SEBA :

capteur de pression type DS-30 ou DST-30 (pression, température)
diamètre 3 cm, longueur 15.2 cm
6 gammes de hauteur courantes entre 0 et 20 m, autres gammes sur commande.
précision ≤ 0.1 % ou ≤ 0.2% (à 25 ° C) suivant le type
centrale d'acquisition de données MDS III - transfert possible par modem.
intervalle de scrutation : de 1 seconde à 1 jour.
14 canaux limnimétriques possibles

ELSYDE :

sondes limnimétriques SPI III ou CCI V1.0 (capteur de pression et de température)
avec centrale CHLOE E ou 2E support de mémorisation sur cartouche mémoire CEE64
batterie au lithium et panneau solaire
1 ou 2 voies limnimétriques
lecteur de cartouche LCM V 3.0 visualisation graphique des fichiers avec le logiciel VISUAL
télétransmission : connexion avec émetteur ARGOS ou METEOSAT
intervalle de scrutation : de 1 à 999 minutes
centrale LIMNI 92
télétransmission par émetteur ARGOS ou modem

MADO - IRIS Instruments :

sonde MADOSOLO avec module d'enregistrement 1 voie
intervalle de scrutation : de 1 minute à 24 heures
précision 0.2 %
lecture avec terminal de poche SAS
télétransmission : adjonction possible d'un modem
modules d'acquisition de données MADOPLUS 1, 2, 3, ou 4 voies limnimètriques.
capteurs de pression conseillés : Schlumberger, Druck ou Trans-Instruments
capteurs de températures BRGM 1, 2, 3, ou PT100
précision 0.2 %
intervalle de scrutation : de 1 minute à 24 heures
lecture avec terminal de poche SAS, ou PC portable
télétransmission : par adjonction d'un modem (versions MADOTEL).

CR2M :

capteur de pression **DRUCK** PTX/110 D et PTX/160D
résolution du cm
précision : 0.3% de la pleine échelle
P.E. : 3.5m, 5m, 10m, etc.
capteur de pression **DRUCK** PDCR 830 et 930
résolution du mm
précision : 0.3% P.E
P.E. : 1.75m et 3.5m.
centrales d'acquisition de la gamme SAB 600 en général 4 voies analogiques
certains types (LMU et LUS-I) permettent également de saisir les mesures de hauteur par capteur d'ultrasons immergés (capteurs CR2M SND-UST-540 ou 570) ou (type LUS-A) d'ultrasons aériens (capteurs CR2M SND-US/A).
lecture par portable , terminal spécialisé ou modem
les séries SAB 600 LUS , RES et AGM disposent en plus d'une liaison série spécialisée télétransmission et compatible Minitel

AUTEG :

Système EMAC 90
capteur de pression différentielle, sortie 0/100 mV ou 4/20 mA
gamme de 0.70 m jusqu'à 100 m et plus
résolution de 0.1 à 1 cm suivant les gammes
centrale d'acquisition de données : ensembles modulaires assemblés à partir d'une unité centrale à microprocesseur CMOS NSC 800. programmation et récupération des données sur site (liaison RS232) ou à distance (option modem PTT, micro-ordinateur ou Minitel).
pas de temps d'acquisition de 1 à 60 mn.
stockage des données sur RAM ou sur cassette . option visualisation des données par afficheur à
cristaux liquides et clavier de commande.
tables de conversion niveaux/débits ou niveaux/volumes stockées en mémoire EEPROM alimentation batterie 12 V.

KROHNE :

sonde immergeable IP 68 ASL 800
hauteur maxi 160 m selon le type de capteur
matériau : Inox 316 Ti, Hastelloyc, Tantale, Monel
sortie analogique 0/4 - 20 mA
options/fonctions complémentaires : Transmetteur intelligent Protocole Hart, sortie digitale.

Avantages et inconvénients des capteurs de pression :

Les capteurs de pression sont d'un encombrement très réduit. Ils ne nécessitent pas la mise en place au dessus du plan d'eau d'un tube de protection vertical. Ils n'obligent pas à une visite de la station à une date fixe (comme le changement de papier enregistreur d'un limnigraphe).

Par contre, ils sont influencés par la température de l'eau (certains modules d'acquisition de données intégrant une correction). Leur linéarité est moins bonne pour les faibles hauteur d'eau. Les dérives dues à un mauvais fonctionnement ne sont pas toujours discernables, d'où la nécessité de procéder à des contrôles ou étalonnages périodiques, et surtout dès qu'il y a suspicion.

Les capteurs de débit :

Par ailleurs certains constructeurs (en particulier A.OTT et HYDROLOGIC) ont conçu des appareils à lecture directe de débit, et donc appelés débitmètres, qui sont composés d'un capteur de niveau ou de pression relié à un module d'acquisition de données, qui intègre à l'aide d'un circuit électronique, ou par traitement numérique une relation Q = f (H), autrement dit une courbe d'étalonnage. Les mesures de niveau sont donc transformés en mesures de débit.

Ces types d'appareil, en plus de l'affichage du débit instantané, peuvent offrir les possibilités suivantes :

- affichage du volume écoulé pendant un certain temps
- enregistrement des débits instantanés sur diagramme
- délivrance d'un signal d'alarme pour une valeur déterminée.
- télétransmission des mesures.

4.4.6. LES MESURE DES VITESSES

Nous ne reviendrons pas sur les mesures de vitesse effectuées dans les conduites forcées (débitmètres)
Pour les écoulements à surface libre lorsqu'aucun équipement de mesure (déversoir ou seuil jaugeur) n'est installé, la détermination de la vitesse moyenne permet également, connaissant la section mouillée, de calculer le débit.
La détermination de la vitesse moyenne nécessite toujours (sauf pour les estimations grossières ou les très petites sections mouillées) plusieurs mesures de vitesse en différents points de la surface et à différentes profondeurs.
Les différentes méthodes de mesure sont les suivantes :

Mesure au flotteur :

Elle consiste à mesurer (au chronomètre) le temps nécessaire à un flotteur pour parcourir une certaine distance. On mesurera dans ce cas uniquement la vitesse moyenne de surface.

Il a été constaté expérimentalement que le rapport entre la vitesse moyenne sur toute la section d'écoulement et la vitesse de surface était relativement constant et proche de la valeur 0,84.

Cette relation permet une approche de la vitesse moyenne lorsque seule la mesure au flotteur est possible.

La répartition des vecteurs vitesses suivant une verticale a une allure parabolique, due à la résistance de l'air en surface et à la rugosité du fond. Latéralement les vitesses sont réduites par la rugosité des berges.

La méthode du flotteur peut être améliorée en utilisant :

- soit un bâton flotteur lesté de longueur voisine de la profondeur de l'écoulement (en s'assurant qu'il ne touche jamais le fond), la vitesse moyenne déterminée intégrera alors les différentes vitesses de profondeur.

- soit un écran flotteur lesté de section quelque peu inférieure à la section de l'écoulement (en s'assurant qu'il ne touche jamais le fond ni les bords), la vitesse moyenne déterminée intégrera alors les différentes vitesses de profondeur et latérales (méthode historique de l'écran d'Anderson).
- soit un flotteur maintenu immergé sur le fond au moment de son lâcher. On mesurera alors le temps qu'il apparaisse à la surface, ainsi que la distance parcourue. Les différentes vitesses de profondeur seront ainsi également intégrées dans la vitesse moyenne déterminée.

Ces méthodes ne seront applicables que si la section mouillée est relativement rectangulaire, régulière et assez petite (au maximum quelques mètres carrés) et quoiqu'il en soit ces mesures restent approximatives.

Jaugeage au moulinet

Lorsque la section d'écoulement est de plus grande dimension et irrégulière, la détermination de la vitesse moyenne se fera par des mesures ponctuelles de vitesse (verticalement et latéralement) à l'aide d'un moulinet.

Les moulinets sont des appareils à hélice, dont la vitesse de rotation est proportionnelle à la vitesse linéaire du fluide qui les traverse .Les hélices sont calibrées en laboratoire.

La vitesse du fluide est donné par la relation : $v = a + b.\omega$

avec a = vitesse minimale de démarrage de l'hélice (inertie due aux frottements)
b = pas de l'hélice.
ω = vitesse de rotation de l'hélice
$\omega = N / t$, N = nombre de tours, t = temps de mesure

La **précision** sur la mesure de la vitesse est :
$dv/v = da/a + db/b + dN/N + dt/t$

Exemple : pour une hélice de pas 0,25 m et une vitesse de courant de 2 m/s l'hélice fera 8 tours par seconde.
Pour un temps de mesure de 1 minute , l'hélice fera 8 x 60 = 480 tours
supposons une erreur de comptage de 2 tours dN/N = 2/480 = 0.4 %
si dt = 0.2 sec, dt/t = 0.2/60 = 0.33 %
da/a est négligeable
L'erreur sur le pas de l'hélice (donné par le constructeur) db/b est de l'ordre de 2 % .(tarage standard).
dv/v sera égal à 2 + 0.4 + 0.3 = 2.7 %
Avec un temps de mesure de 30 s, et pour la même vitesse on aurait dt/t = 0.66, dN/N = 2/240 = 0.8 %
et dv/v = 2 + 0.66 + 0.8 = 3.5 %

Les temps de mesure pratiqués pour les jaugeages au moulinet sont généralement de 30 à 60 secondes pour les vitesses de l'ordre de 1 à 3 m/s.

Pour des vitesses inférieures on utilisera des hélices à pas plus petit, de 0,05 à 0,1 m pour obtenir des précisions équivalentes.

Pour les hélices dites **normales** on veillera à ce que l'axe de l'hélice ne fasse pas un angle de plus de 5 degrés avec la direction du courant sinon on mesurera des vitesses inférieures à la vitesse réelle. Pour les hélices dites **autocomposantes** (de forme spécialement étudiée) les vitesses réelles resteront mesurées sans correction jusqu'à des angles d'incidence pouvant atteindre, suivant les modèles, de 30 à 45 degrés.

Mise en œuvre des jaugeages au moulinet :

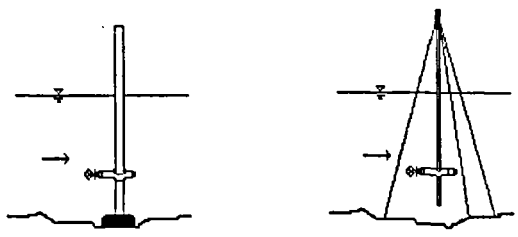
Le nombre de points de mesure en une section sera fonction des dimensions de la section. Sur une même verticale on fera au minimum 3 mesures : le plus près possible de la surface, au milieu, et le plus près possible du fond. Les mesures intermédiaires seront fonction de la profondeur.

Sur le profil en travers on fera également au minimum 3 mesures : le plus près possible des bords et au milieu.

Les mesures intermédiaires seront fonction de la largeur et, en règle générale, soit régulièrement espacées, soit d'espacement normalisé.

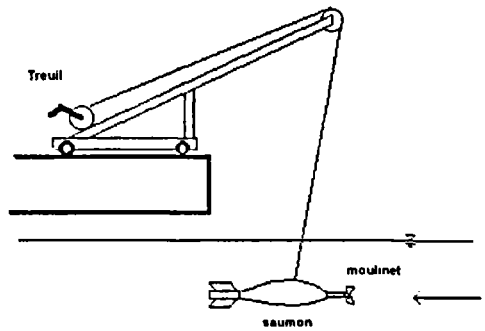
Afin d'accéder aux différents points de mesure les techniques et dispositifs suivants sont utilisés :

- le moulinet est fixé de manière rigide sur une **perche** coulissante reposant verticalement sur le fond (simple perche verticale à socle ou supportée par un trépied)

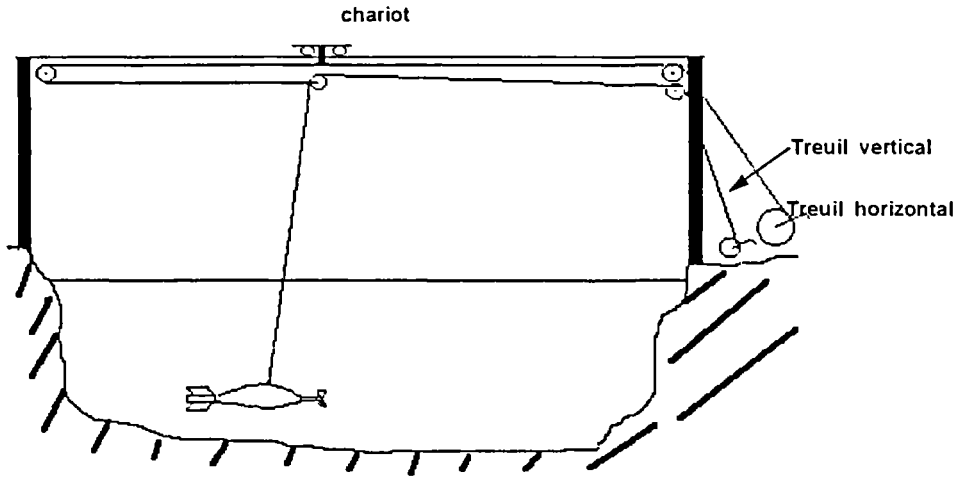


- le moulinet est fixé sur un **saumon** suspendu à un filin et manoeuvré à l'aide d'une **potence** comportant une poulie et un treuil. La potence peut être manoeuvrée à partir de la berge, ou à partir d'un bateau

- pour les sections très larges on utilise fréquemment une **traille téléphérique**



CYCLO - POTENCE



TRAILLE TELEPHERIQUE

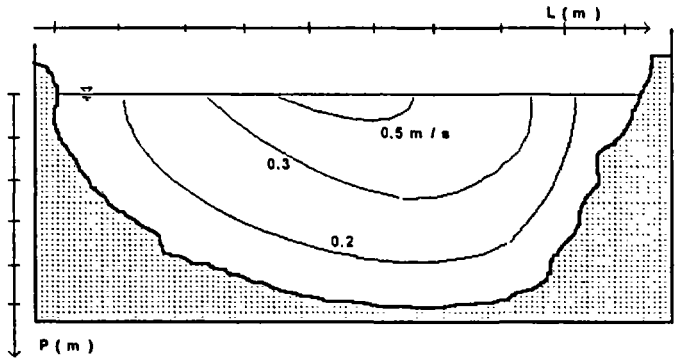
Calcul du débit :

Le calcul du débit passe par l'intégration des vitesses ponctuelles sur toute la section de l'écoulement.

Il existe différentes méthodes d'intégration, les principales étant :

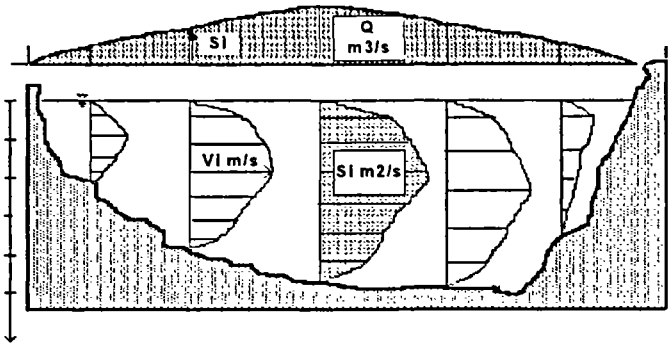
- la méthode passant par le tracé des isotaches (courbes d'égale vitesse) sur la section d'écoulement.

Les débits partiels sont ensuite calculés par surface comprise entre deux isotaches voisines en prenant la moyenne des vitesses de ces deux isotaches.



- on peut également tracer pour chaque verticale de mesure les vecteurs vitesse mesurés. Les surfaces comprises entre la verticale et la courbe joignant l'extrémité des vecteurs vitesses sont planimétrées.

Ces surfaces sont égales à $S_i = \int v_i.dh$ (intégration sur la profondeur) et sont reportées en ordonnées sur le profil transverse. La surface qu'elles délimitent avec l'axe des abscisses est planimétrée et donne la valeur du débit $Q = \int S_i.dl = \iint v_i\, dh.dl$.(intégration sur la section).



Actuellement on utilise également le **moulinet intégrateur** : l'instrument qui coulisse le long d'une tige verticale enregistre les profondeurs et les vitesses correspondantes qui sont intégrées sur toute la hauteur d'eau. La même opération est répétée sur plusieurs verticales à espacements mesurés.

- pour les sections rectangulaires ou voisines on peut également calculer directement la vitesse moyenne en effectuant une moyenne pondérée des vitesses ponctuelles, lorsque celles-ci sont mesurées à des intervalles de profondeur et de largeur normalisés. On multiplie ensuite par la section pour obtenir le débit.

4.4.7. L'ETABLISSEMENT DES COURBES DE TARAGE

Lorsque les mesures de débit sont effectuées de manière répétitive à poste fixe sur une section choisie d'un écoulement (station hydrométrique) les couples de valeur débit-hauteur d'eau mesurés sur toute la gamme des débits permettent d'établir la courbe d'étalonnage (encore appelée courbe de tarage) de la station, $Q = f(H)$.

Si la station hydrométrique a été choisie sur un bief à écoulement uniforme à une hauteur d'eau correspondra une seule valeur de la vitesse moyenne donc une seule valeur du débit (ceci sera d'ailleurs vérifié ou non par la construction de la courbe d'étalonnage).

Lorsque la courbe d'étalonnage aura été établie, la seule lecture ou mesure de la hauteur d'eau permettra de connaître le débit en utilisant cette courbe.

L'utilisation de la courbe d'étalonnage restera valable également à condition que la section de l'écoulement ne soit pas modifiée. Pour une section canalisée, c'est à dire bétonnée ou cimentée, cette condition sera en principe remplie. Pour les sections naturelles , il n'en est pas forcément de même et les courbes de tarage devront être vérifiées et éventuellement reconstruites.

Les principales causes du détarage (variation de la courbe d'étalonnage) d'une station sur section naturelle sont :

- modification de la section par :
  - éboulement des berges
  - surcreusement
  - sédimentation (rehaussement du fond)
- modification de la rugosité des berges et du fond par la variation de la végétation aquatique

4.4.8. DEPOUILLEMENT ET TRAITEMENT DES DONNEES

Le dépouillement et le traitement des mesures de base (hauteurs d'eau, limnigrammes, vitesses) nécessaires au calcul des débits sont à l'heure actuelle grandement facilités et accélérés par l'utilisation de logiciels informatiques.

Le BRGM a en particulier développé depuis plusieurs années une chaîne de logiciels (installés sur ordinateurs centraux, stations de travail ou micro-ordinateurs PC) appelée DELPHES (Dépouillement de données limnigraphiques, pluviographiques ou hydrométriques en séries) qui permet :

- le dépouillement automatique des jaugeages au moulinet.
- la digitalisation des enregistrements limnigraphiques.
- l'archivage et l'édition des courbes d'étalonnage.
- la transformation d'une série de mesures de hauteurs d'eau en débits instantanés correspondants par l'application d'une ou plusieurs courbes d'étalonnage.
- édition d'annuaires des données journalières (hauteurs d'eau, débits)
- discrétisation des hauteurs d'eau ou des débits instantanés à n'importe quel pas de temps.
- les fichiers de débits élaborés au pas de temps journalier, pentadaire, décadaire ou mensuel sont directement utilisables en particulier dans le logiciel de modélisation hydrologique globale GARDENIA (basé sur les relations pluies-débits, ou pluies-niveaux piézométriques).

4.5. METHODES PAR DILUTION

Ces méthodes sont parfois appelées méthodes chimiques de mesure des débits, car elles impliquent l'injection d'un traceur (souvent un produit chimique) dans le cours d'eau à jauger.

Les traceurs les plus utilisés sont le chlorure de sodium, l'iodure de sodium, le bichromate de sodium, le chlorure de lithium, la rhodamine WT.

4.5.1. Méthode par injection continue

Principe :

En une section S1 de l'écoulement on injecte de manière continue et à débit constant une solution de produit chimique (traceur) à concentration élevée et connue. En une section S2 située en aval de S1 on mesure la concentration en traceur résultant du mélange de la solution dans le débit total d'écoulement.

La distance entre la station d'injection et la station de mesure doit être suffisamment grande pour que le mélange soit complet et la concentration mesurée homogène sur toute la section.

Lorsque la concentration mesurée s'est stabilisée à une valeur c. la loi de conservation du débit massique du traceur se traduit par la relation :

$$q.C = Q.c$$

avec q = débit d'injection de la solution de traceur
C = concentration en traceur de la solution injectée
Q = débit de l'écoulement
c = concentration en traceur mesurée à la station S2

le débit total de l'écoulement est donc : $Q = q \cdot \frac{C}{c}$

Aspects pratiques de la méthode :

- on choisira autant que possible un traceur dont la concentration naturelle dans l'écoulement à jauger est nulle ou négligeable par rapport à la concentration de la solution injectée. S'il n'en est pas ainsi, la méthode peut néanmoins être utilisée. Le calcul du débit s'exprime alors par la relation :

$$Q = q \cdot \frac{C - c}{c - c_n}$$

avec c_n = concentration naturelle du traceur dans l'eau.

La précision sur le calcul du débit est dans ce cas moins bonne et elle diminue lorsque c_n augmente.

- le produit injecté doit être chimiquement stable et ne pas être sujet aux phénomènes d'adsorption par les sols, les roches ou les plantes aquatiques.
- le débit et la concentration de la solution injectée doivent être constants, donc contrôlés avec précision.
- le débit du cours d'eau doit être le même à la station d'injection et à la station de mesure.
- pour la mesure de la concentration résultante, des échantillons seront prélevés en différents points de la section d'écoulement et de manière répétitive, de façon à s'assurer de l'homogénéité du mélange.

Cette méthode implique donc une **mise en oeuvre importante**, en particulier pour ce qui concerne le dispositif d'injection de la solution. La durée d'opération et la grande quantité nécessaire de traceur en font également une méthode assez onéreuse.

Pour ces raisons la méthode par injection instantanée, ci-dessous décrite, lui sera bien souvent préférée.

4.5.2. Méthode par injection instantanée

Principe :

En une section S1 de l'écoulement on injecte de manière instantanée un volume v de la solution de produit chimique (traceur) à la concentration C.

En une station S2, située à l'aval et, comme pour la méthode précédente, à une distance de "bon mélange", on calculera la concentration moyenne du traceur sur toute la durée de son passage, cela par des prélèvements répétés d'échantillons en différents points de la section.

La loi de conservation de la masse de traceur se traduit par la relation :

$$v.C = c.Q.T$$

avec

v = volume de la solution injectée
C = concentration en traceur de la solution
c = concentration moyenne en traceur à la station de mesure pendant la durée T
Q = débit du cours d'eau (à déterminer)
T = temps de passage de la totalité du traceur à la station de mesure

d'où le calcul du débit : $Q = \frac{v \,.\, C}{T.\, c}$

Aspects pratiques :

- de même que pour la méthode précédente on choisira de préférence un traceur chimique non présent naturellement dans l'eau de l'écoulement à jauger.

- afin de déterminer la distance de " bon mélange", de même que le temps d'arrivée et la durée de passage du traceur à la station de mesure, il est recommandé d'effectuer un essai préalable par injection de colorant, tel que la fluorescéine par exemple.

- la concentration moyenne à la station de mesure pourra être calculée par intégration des différentes concentrations correspondant au passage du traceur, ou directement mesurée sur un échantillon moyen obtenu par mélange à volumes égaux des différents échantillons prélevés.

- la mise en oeuvre plus rapide de cette méthode peut être encore simplifiée par l'utilisation d'une **variante**, qui consiste à remplacer les mesures de concentration par des mesures de **conductivité électrique :**

La concentration totale en sels dissous dans l'eau est en effet proportionnelle, pour les faibles concentrations, à la conductivité électrique de l'eau. Le coefficient de proportionnalité (généralement compris entre 0.6 et 0.8) est toutefois fonction de la composition chimique des différents sels. On s'assurera donc que celle ci ne varie pas ou peu pendant les mesures. La conductivité électrique variant également avec la température, les conductivités mesurées devront être également, s'il y a lieu, corrigées et ramenées à leur valeur à une température de référence (la plupart des conductivimètres actuels font automatiquement cette correction).

Dans l'application de cette méthode le traceur le plus fréquemment employé est le chlorure de sodium.

5. EXEMPLES D'INSTALLATION DE JAUGEAGE EN FRANCE

La Fontaine de Vaucluse (84)

La source appelée "Fontaine de Vaucluse" est située sur la commune du même nom, à une vingtaine de kilomètres à l'Est d'Avignon. Elle est issue des calcaires de l'Urgonien (Crétacé).

Par son débit elle est la plus importante source de France:

Son débit moyen est de l'ordre de 20 m^3/s, le débit maximal est supérieur à 80 m^3/s (Janvier 1994), le débit minimal mesuré est de 3,8 m^3/s (Janvier 1990).

Elle est à l'origine du nom de ce type particulier de source de karst appelée source vauclusienne, qui se caractérise par son émergence à l'issue d'un conduit subvertical ascendant.

Le conduit ascendant de la Fontaine de Vaucluse débouche dans une vasque qui déborde lorsque le débit dépasse une vingtaine de m^3/s, soit environ la valeur du débit moyen. Pour des débits moindres les émergences se font successivement ou simultanément par des griffons situés à des niveaux inférieurs au travers d'éboulis. Le griffon pérenne le plus élevé se trouve 22,5 m en dessous du niveau de débordement de la vasque.

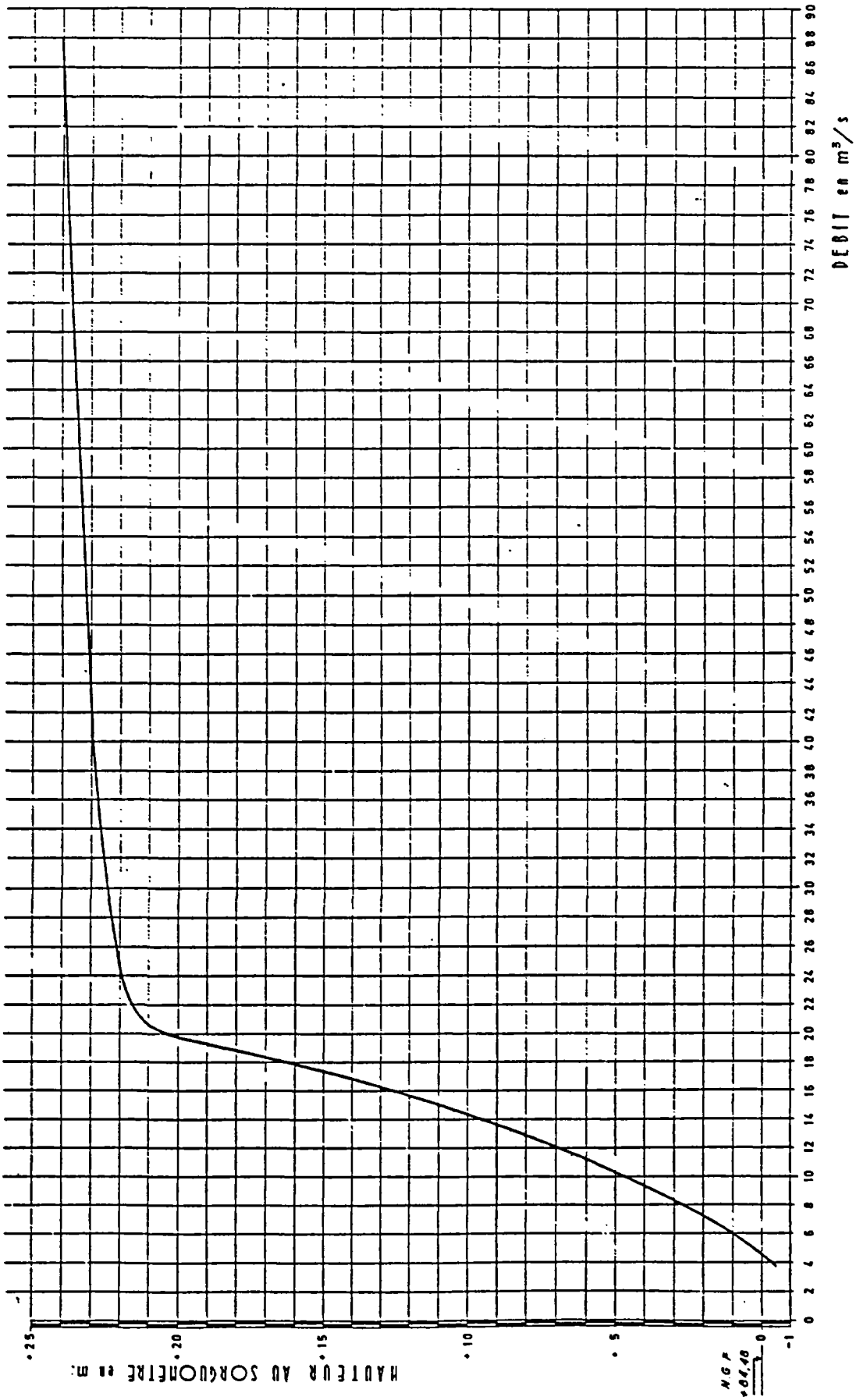
La vasque qui a une profondeur de 21 m a été équipée d'une échelle limnimétrique, appelée sorguomètre, du nom de la rivière Sorgue engendrée par la source.

En 1966 une station de jaugeage a été installée à Mousquety, à 4,5 km en aval de la source.
Cette station intercepte la totalité du débit de la Sorgue, qui est pratiquement celui de la source.

Une cabine renfermant une potence et les treuils de manoeuvre du saumon et de son moulinet avait été installée sur une dalle en béton construite en rive gauche. Ces équipements ont été détruits il y a quelques années.

De nombreux jaugeages effectués par le BRGM depuis 1966 ont permis d'établir une courbe de tarage très fiable entre le débit et la hauteur d'eau lue sur le limnimètre de la vasque. On notera sur cette courbe (voir page suivante), le très net changement de pente correspondant au débordement de la vasque, au-delà duquel de faibles accroissements de charge correspondent à de grandes variations de débit

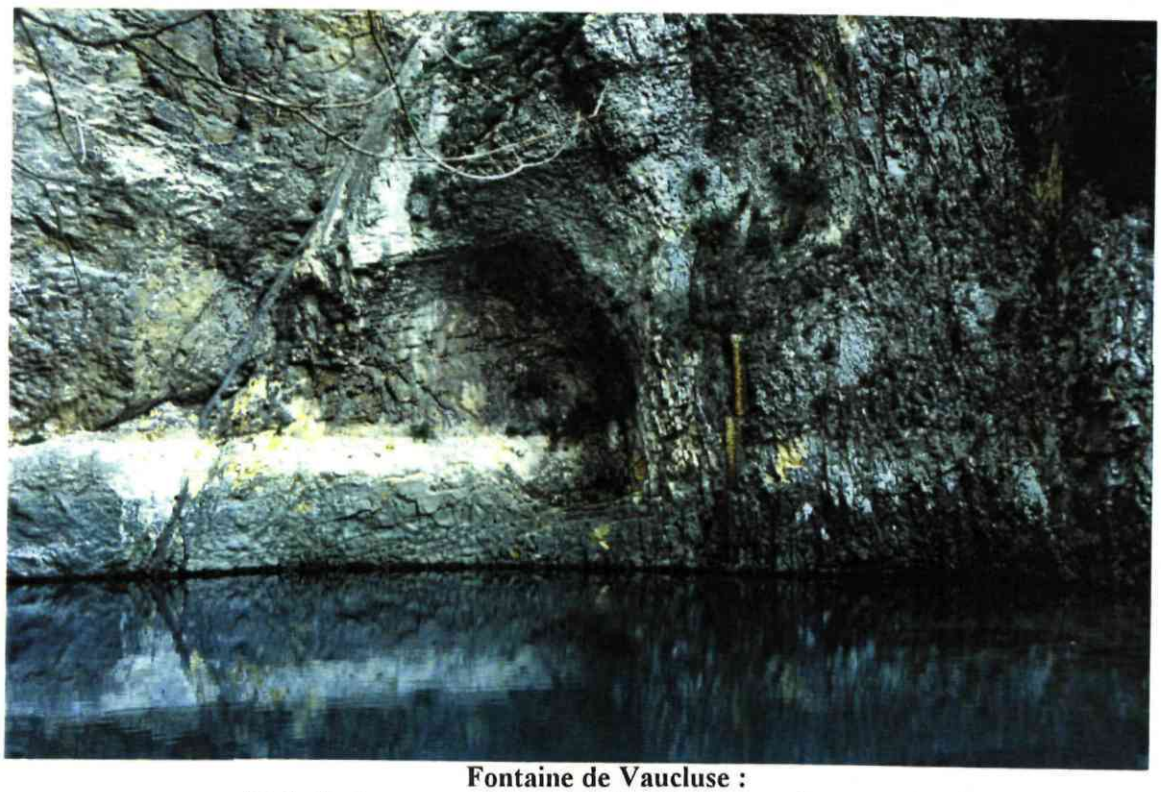
L'installation dans la vasque d'un capteur de pression, qui sera relié à un module d'acquisition de données (AUTEG modèle EMAC), est actuellement en cours sous la direction de la DIREN (SEMA) d'Aix-en-Provence, qui gérera cet appareil de mesure complémentaire.



SORGUOMETRE - COURBE DE TARAGE (d'après les jaugeages effectués à la station de MOUSQUETY par le B.R.G.M entre 1966 et 1972)



Fontaine de Vaucluse :
La vasque en débordement avec un débit de 24,5 m^3/s (22/12/94)
Sur la paroi de la vasque la trace (en blanc) de la crue de janvier 1994 (plus de 80 m^3/s)



Fontaine de Vaucluse :
l'échelle de mesure de niveau dans la vasque (sorguomètre)



Fontaine de Vaucluse : l'écoulement peu en aval de la vasque
Exemple de section naturelle ne permettant pas un jaugeage au moulinet
(section irrégulière et régime torrentiel)



Site de la station de jaugeage de Mousquety ayant permis l'établissement de la courbe de tarage du sorguomètre.

La source du Lez (34)

La source du Lez alimente la ville de Montpellier en eau potable. C'est une source vauclusienne, issue des calcaires karstiques du Crétacé inférieur. Elle jaillit dans une vasque de 30 m de diamètre et de 10 m de profondeur. L'exutoire de la vasque est aménagé en déversoir rectangulaire de 22 m de largeur de pelle, à contraction latérale et à seuil épais. Le déversoir est équipé d'une échelle limnimétrique et d'un capteur de pression. Ce déversoir n'est submergé qu'en période de fortes crues.

Depuis 1982, et à la suite d'une reconnaissance du conduit souterrain en plongée libre, la source est en effet captée en amont directement dans le conduit, soit à plus de 100 m de profondeur sous le sol et grâce à l'aménagement remarquable suivant:

- creusement d'une galerie horizontale et d'une chambre souterraine à l'emplacement du captage. La galerie permet actuellement le refoulement de l'eau pompée.
- creusement à partir de la chambre souterraine et vers la surface de 2 puits de 3,6 m de diamètre. Ces puits contiennent actuellement un ascenseur et un monte-charge vers le bâtiment de surface qui renferme les installations électriques de commande et de surveillance automatique des pompages.
- exécution de 4 forages de 1,80 m de diamètre à partir de la chambre souterraine et jusqu'au toit du conduit karstique. Trois de ces forages sont équipés d'unités de pompage permettant chacune un débit de 1 m^3/s.

La station de commande est entièrement automatisée et comporte en particulier un régulateur et des variateurs de fréquence, qui permettent d'ajuster le débit de pompage en fonction de la consommation de la ville.

Tout en assurant les besoins actuels de la ville de Montpellier, le nouveau captage ménage un rejet dans le Lez à un débit minimum de 160 l/s. Lorsque le niveau d'eau dans la vasque est à 1,10 m en dessous de la crête du déversoir ce débit de soutien du Lez est encore assuré directement par gravité à partir d'une dérivation depuis la vasque.



La source du Lez : le déversoir de la vasque après une période de crues (17/09/94)

Les sources du massif de la Sainte Baume

Ce sont des exsurgences des calcaires karstiques du Jurassique inférieur. Quelques stations hydrométriques ont été installées par la Société du Canal de Provence. Ces stations sont gérées actuellement par la DIREN (SEMA) d'Aix-en-Provence.

- les sources de l'Huveaune (83)

La station de mesure située à environ 4 km en aval des sources, comporte sur la même section un déversoir rectangulaire à seuil épais couplé avec un seuil jaugeur Parshall.

Le seuil jaugeur sert à la mesure des faibles débits (étiage), le déversoir n'est submergé qu'en période de crues.

Les niveaux sont enregistrés à l'aide d'un limnigraphe à tambour horizontal OTT.



Equipement de mesure du débit sur l'Huveaune :
sur la gauche de la photo le seuil Parshall, sur la droite le déversoir rectangulaire à seuil épais

- sources du Caramy (83)

Une station de mesure se situe aux environs de Mazaugues et contrôle le débit de cette rivière issue de plusieurs ruisseaux et plusieurs sources, dont le bassin versant total est de 17 km^2.

Cette station est équipée d'un déversoir triangulaire à seuil épais (angle d'ouverture de 150°), qui permet la mesure d' une grande gamme de débits.

Les niveaux sont mesurés par un capteur de pression et enregistrés sur un module d'acquisition AUTEG, modèle EMAC à cassette (situé dans l'abri visible sur l'extrême droite de la photo).



Le déversoir triangulaire à seuil épais du Caramy

Une autre station existe en amont de Mazaugues sur une des sources, elle est équipée d'un couple de deux déversoirs rectangulaires à paroi mince (sans contraction latérale) de hauteur de crête différentes pour les faibles et forts débits.

Les niveaux sont mesurés par un capteur de pression et enregistrés sur un module d'acquisition AUTEG (modèle EMAC).



Les deux déversoirs rectangulaires à paroi mince de Mazaugues.
On notera les deux prises d'air qui évitent l'adhérence à la pelle de la lame d'eau déversée



- la source de Saint-Pons (13)

Cette source est située à Gémenos, au dessus de l'abbaye de Saint-Pons . Elle sort à flanc de rocher, et est collectée dans un bassin à empierrement naturel se terminant par un déversoir rectangulaire à paroi mince avec contraction latérale. Les mesures de niveau sont enregistrées par un limnigraphe vertical OTT.



Le déversoir rectangulaire à paroi mince de la source de Saint-Pons



Les sources du Causse du Larzac (12)

- La source du Boundoulaou

Cette source du versant Nord du Causse du Larzac est située sur la commune de Creissels (Aveyron), à 3 km de Millau.

Elle sort des calcaires karstiques de l'Aalénien (Jurassique moyen) qui surmontent les marnes du Toarcien.

Le ruisseau auquel elle donne naissance se jette dans le Tarn.

Le site de jaugeage est équipé d'un déversoir triangulaire à seuil épais. L'angle d'ouverture est très grand (175 degrés), de manière à couvrir une grande gamme de débit avec une précision un peu supérieure à celle que donnerait un déversoir rectangulaire sans contraction latérale.

Les mesures de niveau d'eau sont faites à l'aide d'un capteur Paratronic MPX 3418, de gamme 0 à 3m, et d'un module d'acquisition MADO Cod 4 modèle 109, doublé d'un limnigraphe vertical OTT 16 et d'une échelle limnimétrique.

Le plus fort débit mesuré et taré depuis l'installation de l'équipement est de 300 l/s.

La plus forte crue observée (27/09/92) avant l'installation de l'équipement avait été estimée entre 5 et 10 m^3/s.



Le déversoir triangulaire à très grand angle du Boundoulaou (photo J. Ricard)

- La source du Lavencou

Elle se situe sur le flanc Ouest du Causse du Larzac, sur le territoire de la commune de St Georges de Luzençon, à environ 7 km au SW de Millau. Elle est issue également des calcaires karstiques de l'Aalénien.

Le site de mesure est équipé d'un déversoir triangulaire à seuil épais et à double échancrure. L'angle d'ouverture principal est de 140 degrés et le second (mesure des faibles débits) est de 90 degrés.

Les charges d'eau sont mesurées à l'aide d'un limnigraphe vertical OTT 16, doublé d'une échelle limnimétrique. Un capteur de pression avait été installé précédemment par la DDE, mais a été retiré.

Le débit maximum mesurable est 3 m^3/s. Le débit maximum mesuré à ce jour est 1.3 m^3/s, correspondant à une charge d'eau de 0,9 m.



La source du Lavencou : le déversoir triangulaire à deux échancrures (photo J. Ricard)

6. RECOMMANDATIONS POUR L'EVALUATION DE PROJETS D'INSTALLATION

Les éléments à considérer pour tout projet de jaugeage de source et pour le choix de l'équipement nécessaire sont les suivants :

- accessibilité du site : nécessité ou non de travaux préliminaires pour permettre ou faciliter l'accès.
- suivant le type de source et les caractéristiques topographiques et géologiques de l'émergence, détermination du type de captage le plus adéquat soit pour jaugeage uniquement, soit pour exploitation de la source et mesure des débits.
- ordre de grandeur et variabilité du débit de la source, c'est à dire débit minimum, moyen et maximum.
- présence ou non de transport solide, en particulier lorsque la station de mesure est assez éloignée de l'émergence.
- en fonction de l'objectif du projet :
  - précision souhaitée des mesures,
  - fréquence souhaitée des mesures (mesures ponctuelles, périodiques, ou en enregistrement continu)
- disponibilité du personnel de mesure, nécessité ou non de télétransmission.
- maintenance et contrôle du calibrage de l'équipement de mesure.

Lorsque le captage d'une source a été ou doit être réalisé dans un but d'exploitation, le transfert de l'eau se fait souvent totalement sous conduites forcées. Dans ce cas les mesures de débit ne peuvent être faites qu'à l'aide de compteurs volumétriques ou de compteurs de débits, de mesures de pression sur des coudes ou étranglement, ou encore éventuellement à l'arrivée finale dans un réservoir par mesure de ses variations de niveau dans le temps.

Lorsque l'écoulement se fait à la pression atmosphérique la mesure du débit se fera dans la majorité des cas, et en particulier pour les enregistrements continus, par l'installation de dispositifs jaugeurs : déversoirs, seuils jaugeurs, ou canaux à ressaut.

Les tableaux ci-après, extraits des normes ISO 8368-1985 (F) et ISO 8363-1986 (F) résument les différents critères de choix des principaux dispositifs utilisés, les gammes de débits couvertes, les précisions des mesures ainsi que les conditions restrictives.

Tableau 1 — Applications et limitations des dispositifs

Type	Norme internationale	Erreurs limites caractéristiques du débit calculé, %	Limite modulaire	Limitations géométriques	Application caractéristique
Déversoirs en mince paroi	ISO 1438/1	1 à 4	•	2 ••	Laboratoire, essais de pompage, eau exempte de sédiment
Déversoirs à seuil épais					
a) profil rectangulaire	ISO 3846	3 à 5	66 %	1,5 ••	Lorsque l'économie et la facilité de construction sont des facteurs importants
b) à extrémité arrondie	ISO 4374		80 %	1,5 ••	
c) en V			80 %	1,5 – 3,0 ••	Canaux d'irrigation avec peu de chute disponible et une grande gamme de débits
Déversoirs à profil triangulaire	ISO 4360/1	2 à 5	75 %	3,5••	Réseaux hydrométriques et principaux canaux d'irrigation
Déversoirs plats en V	ISO 4377	2 à 5	70 %	2,5••	Ouvrages hydrométriques avec une grande gamme de débits
Canaux jaugeurs à long col	ISO 4359	2 à 5	74 %	0,7†	Chenaux chargés de sédiments, écoulements avec débris, écoulements avec poissons migrateurs, conduites et tuyaux partiellement remplis, écoulements dans les égouts
Méthode de la profondeur en bout	ISO 3847	5 à 10	•	N/A ‡	Lorsqu'une moindre précision peut être admise dans un souci de simplicité et d'économie

• La nappe doit être entièrement aérée.

•• H/P maximum, ou H est la charge totale en amont et P est la hauteur de pelle du déversoir.

† A_t/A_u maximum, ou A_t et A_u sont les sections transversales du col et du chenal d'approche respectivement.

‡ N/A = Non applicable.

Tableau 2 — Débits comparatifs pour différents déversoirs et canaux jaugeurs

Dispositif	D[1] (m)	P[1] (m)	b[1] (m)	m[1] (pente)	L[1] (m)	Débit, m^3/s min.	max.
Déversoirs							
En mince paroi, sans contraction latérale	—	0,2	1,0	—	—	0,005	0,67
	—	1,0	1,0	—	—	0,005	7,70
En mince paroi, contracté	—	0,2	1,0	—	—	0,009	0,45
	—	1,0	1,0	—	—	0,009	4,90
En mince paroi, triangulaire	—	—	$\theta = 90°$	—	—	0,001	1,80
À seuil épais à extrémité arrondie	—	0,15	1,0	—	0,6	0,030	0,18
	—	1,0	1,0	—	5,0	0,100	3,13
Rectangulaire à seuil épais	—	0,2	1,0	—	0,8	0,030	0,26
	—	1,0	1,0	—	2,0	0,130	3,07
À seuil épais en V	—	0,30	$\theta = 90°$		1,50	0,002	0,45
	—	0,15	$\theta = 150°$		1,50	0,007	1,68
À profil triangulaire	—	0,2	1,0	—	—	0,010	1,17
	—	1,0	1,0	—	—	0,010	13,00
Plat en V	—	0,2	4	1:10	—	0,014	5,00
	—	1,0	80	1:40	—	0,055	630
Canaux jaugeurs							
Rectangulaire	—	0,0	1,0	—	2,0	0,033	1,70
Trapézoïdal	—	0,0	1,0	5:1	4,0	0,270	41,00
À col en U	0,3	0,0	0,3	—	0,6	0,002	0,07
	1,0	0,0	1,0	—	2,0	0,019	1,40

1) Légende:

D: diamètre du col en U

P: hauteur du déversoir

b: largeur du déversoir, ou col du canal jaugeur

m: pentes latérales; 1 vertical; *m* horizontal

L: longueur du col du canal jaugeur ou de la crête du déversoir.

NOTE — Les dimensions sont données seulement à titre d'exemple, dans un but comparatif.

Tableau 1 — Conditions restrictives

Méthode			Critère						Erreur limite	
N°	Description	Norme internationale	Largeur	Profondeur	Vitesse	Charge sédimentaire	Conditions d'approche	Facteur temps	Pourcentage minimum	Commentaire
1	Exploration du champ des vitesses à l'aide d'une perche tenue dans la main	ISO 748	L, M, S	S	S, M		b, c, d	J, K	± 3	A, B
2	Exploration du champ des vitesses à partir d'un pont	ISO 748	M, L	M, L	M, L		b, c, d	K	± 3	A, B, C, D
3	Exploration du champ des vitesses, câble aérien	ISO 748	M, L	M, L	M, L		b, c, d	K	± 4	A, B, C
4	Exploration du champ des vitesses, canot à l'arrêt	ISO 748	M, L	M, L	M, L		b, c, d	K	± 4	A, B, C, E
5	Exploration du champ des vitesses, canot mobile	ISO 4369	L	M, L	M, L		b, c, d	K	± 6	A, B, E
6	Exploration du champ des vitesses, flotteurs	ISO 748	M, L	M, L	M, L, S		b, c, d	K	± 10	F
7	Pente de la ligne d'eau	ISO 1070	M, L	M, L	M, L		b, c, d	K, N	± 10	Q
8	Ultrasons	ISO 6416	M, L	M, L	M, L, S	R	b, c, d	G, J, H	± 5	
9	Électromagnétique	ISO/TR 9213	M, S	S, M	S, M		b, d	G, H, J	± 5	T
10	Dilution, injection continue de traceur chimique	ISO 555/1	S, M	S, M	S, M		c, g, k	K, N	± 3	
11	Dilution, injection instantanée de traceur chimique	ISO 555/2	S, M	S, M	S, M		c, g, k	K	± 3	
12	Dilution, injection instantanée de traceur radioactif	ISO 555/3	S, M	S, M	S, M		c, g, k	K	± 3	
13	Dilution, injection continue de traceur radioactif	ISO 555/3	S, M	S, M	S, M		c, g, k	K, N	± 3	
14	Cubage	ISO 2425						K	± 10	H
15	Déversoirs triangulaires en mince paroi	ISO 1438/1	S	S	M, S	I	a, b, e, j	J, G	± 3	
16	Déversoirs rectangulaires en mince paroi sans contraction latérale	ISO 1438/1	S	S	M, S	I	a, b, e, f, j	J, G	± 1	
17	Déversoirs rectangulaires en mince paroi avec contraction latérale	ISO 1438/1	S	S	M, S	I	a, b, e, f, j	J, G	± 1	
18	Déversoirs à seuil épais, à arête vive à l'amont	ISO 3846	M, S	S	M, S	I	a, b, e, h, j	J, G	± 5	
19	Déversoirs à seuil épais, à arête amont arrondie	ISO 4374	M, S	S	M, S	I	a, b, e, h, j	J, G	± 5	
20	Déversoirs à profil triangulaire	ISO 4360	M, S	S	M, S	I	a, b, e, j	J, G	± 5	
21	Déversoirs à profil triangulaire, plats en V	ISO 4377	M, S	S	M, S	I	a, b, e, j	J, G	± 5	
22	Déversoirs à seuil épais, en V	ISO 8333	M, S	S	M, S	I	a, b, i	J, G	± 5	
23	Canaux jaugeurs, rectangulaires	ISO 4359	M, S	S	M, S	I	a, b	J, G	± 5	
24	Canaux jaugeurs, trapézoïdaux	ISO 4359	M, S	S	M, S	I	a, b	J, G	± 5	
25	Canaux jaugeurs, à col en U	ISO 4359	M, S	S	M, S	I	a, b, i	J, G	± 5	
26	Déversements dénoyés (détermination de la profondeur en bout), canaux rectangulaires	ISO 3847	M, S	M, S	M, S		a, b	J, G	± 10	
27	Déversements dénoyés (détermination de la profondeur en bout), canaux non-rectangulaires	ISO 4371	M, S	M, S	M, S		a, b	J, G	± 10	

Tableau 2 — Symboles utilisés au tableau 1

Symbole	Définition
a	L'écoulement doit être tranquille
b	L'écoulement ne doit pas avoir de courants transversaux
c	Le chenal doit être relativement exempt de végétation
d	Le chenal doit être convenablement rectiligne et présenter une section uniforme
e	Le chenal doit être convenablement rectiligne et présenter une section symétrique sur une longueur amont d'environ 10 largeurs du chenal
f	Le chenal doit posséder des parois verticales et un radier plan sur une distance amont supérieure à 10 fois la largeur de la lame déversante à la hauteur maximale
g	L'écoulement dans le chenal doit être turbulent (même avec un ressaut) pour assurer un bon mélange
h	Le chenal doit être rectangulaire sur une distance amont au moins double de la hauteur maximale
i	Le chenal doit avoir une forme proche d'un U
j	La répartition des vitesses doit être proche de la normale
k	Le chenal doit être exempt de rentrants dans les rives et de creux dans le lit
A	Dans la méthode d'exploration du champ des vitesses, si la vitesse est mesurée à une cote égale à 0,6 fois la profondeur ou par la méthode des deux points, l'erreur limite minimale peut aller jusqu'à 5 %
B	Dans la méthode d'exploration du champ des vitesses, si la vitesse est mesurée en surface, l'erreur limite minimale peut aller jusqu'à 10 %
C	Il peut être nécessaire d'appliquer des corrections pour tenir compte de la distance ou de l'air et des effets des câbles immergés
D	Erreur importante qui peut être due à l'effet de jetée
E	Erreur importante qui peut être due à la dérive, à l'obstacle dû au bateau et à l'effet de soulèvement
F	L'utilisation de cette méthode n'est recommandée que quand l'effet du vent est faible et qu'aucune autre méthode ne peut être utilisée. Ces conditions d'emploi peuvent être si diverses qu'il n'est pas possible de donner une précision représentative, mais, en général, la précision de cette méthode est plus faible que celle des méthodes conventionnelles utilisant des moulinets, et plus grande que celle de la méthode de la pente de la ligne d'eau
G	Méthode permettant des mesures plus fréquentes de débit
H	Méthode convenant aux canaux à marée
I	Il ne doit pas y avoir une concentration notable de sédiments lourds
J	Méthode rapide (moins de 1 h)
K	Méthode lente (1 à 6 h)
L	Grande largeur (supérieure à 50 m) ou grande vitesse (supérieure à 3 m/s) ou grande profondeur (supérieure à 5 m)
M	Largeur moyenne (entre 5 et 50 m) ou vitesse moyenne (entre 1 et 3 m/s) ou profondeur moyenne (entre 1 et 5 m)
N	Méthode très lente (plus de 6 h)
Q	Méthode approximative, utilisée quand la méthode d'exploration du champ des vitesses n'est pas praticable, et que l'on peut déterminer la pente avec une précision suffisante
R	La concentration des matériaux en suspension doit rester faible afin d'éviter une perte excessive du signal acoustique; pour la même raison, l'écoulement doit être exempt de bulles
S	Petite largeur (inférieure à 5 m) ou faible profondeur (inférieure à 1 m) ou faible vitesse (inférieure à 1 m/s)
T	Peut être utilisé dans les cours d'eau où il y a des herbes ou matériaux du lit qui se déplacent

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AIGROT M. (1966) - Etude hydrogéologique : l'écoulement de la Fontaine de Vaucluse. Fac. Sci. Univ. Bordeaux, thèse 3e Cycle Hydrogéol., .

ALDEGHERI M. (1979) - Manuel d'hydrométrie. Tome IV - Mesure des débits à partir des vitesses. ORSTOM.

ANDRE H. *et al.* (1976) - Hydrométrie pratique des cours d'eau - Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France (EDF) - Ed.Eyrolles - Mesure du débit : stations hydrométriques, jaugeage au moulinet et méthode de dilution.

AURIOL J., Bonnet M. (1972) - La source sous-marine karstique de Port-Miou (commune de Marseille), bilan des études au 31 Décembre 1971, Examen des problèmes de captage - BRGM 72 SGN 028 AME.

AUSSEUR J.Y. , JEAN Ph. (1987) - Guide d'utilisation de MADO - BRGM - Rapp. 87 SGN 474 EAU.

BOURGUET L. (1984) - Captage des sources. annexe n° 3 d'une communication présentée au Cours d'Hydraulique villageoise à Sophia Antipolis du 7 au 30 Novembre 84 et à Bamako (MALI) du 4 au 12 décembre 84. (BURGEAP)

CARLIER M. (1972) - Hydraulique générale et appliquée - Eyrolles.

CASTANY G. (1982) - Principes et méthodes de l'hydrogéologie. - Bordas, Paris - Dunod Université.

CASTANY G., MARGAT J. (1977) - Dictionnaire français d'hydrogéologie - BRGM.

CASTEX L. (1969) - Quelques nouveautés sur les déversoirs pour la mesure des débits. La Houille Blanche - N° 5.

CAUVIN A. (1960) - Notions d'hydraulique - Eyrolles.

CEMAGREF (1994) - Guide pratique d'hydrométrie (application de l'article "L 232-5 du Code Rural).

CEMAGREF (1989) - Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux - Division Hydrologie, Hydraulique fluviale et souterraine.

CERH (1965) - Etude hydrogéologique de la source du Lez, (Hérault) 43 p. C. Drogue et R. Plégat.

CHARVET A. (1882) - Les sources minérales d'Euzet. - Bull. Soc. sc. litt. d'Alès, t. XIV, p.105, t. XV, p. 97-131.

COLLIN J.J., PACHOUD A., AMAT-CHANTOUX R.,CAMUS G., TOUBIN J. (1969) - Dispositif du jaugeage de sources sous couverture nivale - BRGM 69 SGN 076 JAL.

CORNET G., DUROZOY G., GOUVERNET Cl., MUNCK F. (1963) - Source sous marine de Port Miou. Etude par prospection géophysique. Livret guide hydrogéologique - BRGM - Rapport DS 63a 107.

CORNET G.,DUROZOY G.,GOUVERNET Cl., PALOC H. (1963) - La Fontaine de Vaucluse - (Rapport D.S.63 a 106) BRGM.

CORROY G. (1958) - La Fontaine de Vaucluse. Bull. Inst. Océan. Monaco n° 1.131 - Nov 1958.

CORROY G. (1958) - Les résurgences sous marines de Cassis - Bull. Inst. Ocean. Monaco. Nov 1958.

CORROY G., DUROZOY G. (1966) - La source minérale de Fontan (Alpes Maritime)-Situation des émergences-Travaux de reconnaissance avant captage - BRGM - Rapport DSGR 66 A 4.

CUSTODIO E., LLAMAS M.R. (1976)- Hydrologia subterranea - Ediciones Omega, S.A. Barcelona.

DEBUISSON J., LEMAIRE B., PALOC H. (1966) - Les sources littorales et sous-marines du Languedoc Roussillon-Etude documentaire préliminaire - BRGM - (Rapport DSGR 66 A 63).

DEGREMONT - Mémento Technique de l'Eau.

DELANY F., MENARD F. (1964) - Note sur les résurgences entre Villefranche et Menton (Alpes Maritime) - BRGM Rapport D.S.G.R. 64 A 21.

DROGUE C. (1964) - Etude géologique et hydrométrique des principales résurgences de la région nord montpelliéraine. Sources du Lez, du Lirou et de Sauve.

DUMAS L. (1896) - Débit de la Fontaine de Nîmes Bull. Soc. Sc. Nat. de Nîmes p.100-109.

DUPONT A. (1971) - Hydraulique urbaine - Tome I Hydrologie - Captage et traitement des eaux - Eyrolles.

FARAND R. GARNIER J.L. (1991) - Etablissement thermal. Equipement en déversoir en paroi mince des sources PAC 4 S 91 St Gilles et Marjorie-Caractéristiques des déversoirs mis en place.

FLANDRIN J., PALOC H. (1969) - Etude d'une source de karst: la Fontaine de Vaucluse (France). Méthodes et résultats. Actes 5e Congr. Intern. Spéléol., Stuttgart.

FORKASIEWICZ J., MARGAT J. (1976) - Des actions sur les sources peuvent-elles constituer une méthode d'investigation sur les aquifères ? - Note technique BRGM n° 76/8 SGN/AME.

GALLE-CAVALLONI H. , FARAND R. (1973) - Stations de jaugeage en haute altitude . Principe et méthodes de réalisation . BRGM - Rapp. 73 SGN 151 AME.

GALLE-CAVALLONI H., PALOC H. (1968) - Equipements réalisés par le BRGM pour l'étude de la Fontaine de Vaucluse. A.I.H., Cong. d'Istanbul. Mém., t. 8. PP. 502-524.

GALLOCHER P. (1954) - Contribution à l'étude de l'émergence sous marine de Port Miou -Ann. Spéléo, t. IX, p. 169-181.

GARNIER J.L. (1992) - Etablissement thermal d'Aix-en-Provence 13 - Contrôle du débit des émergences PAC 4 S 92 - Impératrice et Malherbe - Cézanne - Méjanes effectuées le 26 Mars 1992 -Compte rendu de mesures

GEZE B. (1938) - Les Sources mystérieuses des Monts de la Gardiole - (Hérault) La géographie t.LXIX.

GEZE M. (1939) - Influence de la tectonique sur la localisation des sources vauclusiennes. Actes Ier Congrès mat.spéléo.Mazamet p.5-14.

GROUD P. (1966) - Contribution à l'étude du déversoir Thomson. Essai de formulation d'une loi de débit d'un déversoir Thomson. Influence de la pelle. Thèse de Docteur-Ingénieur Fac. des Sc. de Toulouse.

GUIGE J. et GIRARD J. (1949) - La Fontaine de Vaucluse Avignon Ed. Nallière Fr.

JACCON G. (1987) - Manuel d'hydrométrie. Tome V. Tracé de la courbe de tarage et calcul des débits. ORSTOM.

LABORDE J.P. (1982) - Eléments d'hydrologie de surface. Ecole Nat. Sup. de Géol. appliquée et de Prospection Minière . Nancy.

LENCASTRE A. (1969) - Manuel d'hydraulique générale . Eyrolles

LETOURNEUR J. , MICHEL R. (1971) - Géologie du Génie Civil - Collection U - Série Géologie - Armand Colin.

MARGAT J. (1981) - Gestion des ressources en eau souterraine par aménagement de source - Communication présentée au IIIème Symposium sur les ressources en eau des pays arabes, organisé par l'ACSAD. à Rabat (Maroc) les 21-27 Septembre 1981. Note technique BRGM 81/5.SGN/EAU.

MORET L. (1946) - Les sources thermo-minérales - Hydrogéologie - Géochimie - Biologie - Masson Ed.

NORMAND M. (1988) - Hydrométrie - Pratique des mesures et exploitation des données - BRGM - Note technique 88/14 3E

NORMAND M. (1985) - Programme DEPJAU. Dépouillement de Jaugeages au moulinet. BRGM - Note technique SGN/EAU n° 85/25.

POTIE L. (1974) - Captage des résurgences sous-marines d'eau douce. Observations sur les effets du barrage expérimental de Port-Miou - BRGM 74 SGN 272.

REMENIERAS G. (1972) - L'hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles.

RICOUR J. (1971) - Syndicat de recherches d'eau de Port-Miou (Bouches du Rhône) - Compte-rendu d'un essai sur modèle réduit - BRGM 71 SGN 411

ROCHE M. (1963) - Hydrologie de surface . Gauthier-Villars.

ROCHE M.F. (1986) - Dictionnaire français d'hydrologie. Masson

SALVAYRE H. (1974) - Contribution à l'étude des origines des résurgences côtières de Font Estramar, Font Dame. Mémoires et Documents 1974, nouvelle série vol.15, Phénomènes karstiques, tome II.

SONCOURT E., NORMAND M. (1993) - Plate-forme métrologique- Tests comparatifs de matériels d'acquisition automatique de données hydro-pluviométriques. Volume 1 : Présentation générale du projet. Mesures comparées de 2 systèmes à capteur de pression et d'un limnigraphe mécanique à flotteur, volume 2 : Etude documentaire et inventaire du matériel disponible sur le marché - BRGM Rapports R 36759, R 37856 SGN 93 CHA.

THIERY D. (1985) - La chaîne DELPHES. Dépouillement de données limnigraphiques.- BRGM - Note technique SGN/EAU n° 85/25.

TISON L.J. (1953) - Cours d'hydraulique (Gand) 1950 et 1953, I. Conduites, orifices, déversoirs. II. Cours d'eau en mouvement permanent, filtration.

TROMBE F. (1969) - Les eaux souterraines - Que sais-je ? - Press. Univ. France.

TROSKOLANSKY A. (1962) - Théorie et pratique des mesures hydrauliques. Dunod.

VALEMBOIS J. (1958) - Mémento d'hydraulique pratique (Collection du Laboratoire National d'Hydraulique- Eyrolles).

PRINCIPALES NORMES FRANCAISES ET INTERNATIONALES CONCERNANT LES MESURES DE DEBIT DES LIQUIDES DANS LES CANAUX DECOUVERTS

AFNOR - Tour Europe - Cedex 7 - 92. PARIS La Défense.

Principes directeurs généraux pour le choix d'une méthode - Norme ISO 8363 - 1986

Méthodes d'exploration du champ des vitesses - Norme ISO 748 - 1979

Moulinets à élément rotatif - Norme NF ISO 2537 - 1988

Recueil et traitement des données pour la détermination des erreurs de mesurage - Norme NF ISO 1088 - 1986

Mesure de la profondeur de l'eau, sondeurs à écho - Norme ISO 4366 - 1979

Méthode d'évaluation du débit par détermination de la profondeur en bout des chenaux rectangulaires à déversement dénoyé - Norme NF X 10-314 - 1983 (Norme ISO 3847 - 1977)

Mesure du débit de l'eau dans les canaux découverts au moyen de déversoirs en mince paroi - Norme NF X 10-311 - 1983 (Norme ISO 1438/1 - 1980)

Déversoirs rectangulaires à seuil épais - Norme NF ISO 3846 - 1990

Méthodes de dilution pour le mesurage du débit en régime permanent - Norme ISO 555/1 - 1973 et Norme ISO 555/2 - 1974
Norme ISO 9555(révision de la norme ISO 555) - à paraître.