

Hydrométrie pratique des cours d'eau

Mesure du débit

Guide pratique de terrain

par Bruno ARFIB – Aix-Marseille Université

1- Définitions

• le débit :

Le débit est le volume d'eau traversant une section transversale du cours d'eau pendant une unité de temps. On l'exprime en m^3/s dans le Système International (SI) d'unités, et en l/s pour les faibles débits.

Les résultats de mesures de débit s'écrivent avec trois chiffres significatifs. Ceci s'explique compte tenu de la précision que l'on peut espérer atteindre dans les conditions normales de mesures.

De 0 à 1 m^3/s : on met trois chiffres après la virgule (ex : 0,457 m^3/s)

De 1 à 10 m^3/s : on met deux chiffres après la virgule (ex : 4,57 m^3/s)

De 10 à 100 m^3/s : on met un chiffre après la virgule (ex : 45,7 m^3/s)

De 100 à 1000 m^3/s : on met la valeur entière (ex : 457 m^3/s)

Au dessus de 1000 m^3/s : on arrondi à la dizaine (ex : 4570 m^3/s)

• la courbe d'étalonnage :

L'étude du régime d'un cours d'eau passe par la connaissance des débits sur une période donnée selon un pas de temps choisi. Pour éviter de mesurer à chaque fois le débit, il est possible d'établir une courbe d'étalonnage (ou courbe de tarage) qui donne une relation hauteur/débit dans la section considérée.

Rappelons que :

- 10 ou 15 jaugeages bien répartis sur toute l'amplitude de variation de cote à l'échelle (en période d'étiage, en période de moyennes eaux et en période de crue) sont nécessaires pour tracer la courbe de tarage.

- des jaugeages de contrôle doivent être faits pour déceler des détarages éventuels (changement de la morphologie du lit du cours d'eau par exemple).

- le tracé de la courbe est d'autant plus précis que les variations de cote à l'échelle sont faibles pendant la durée des mesures.

• Généralités

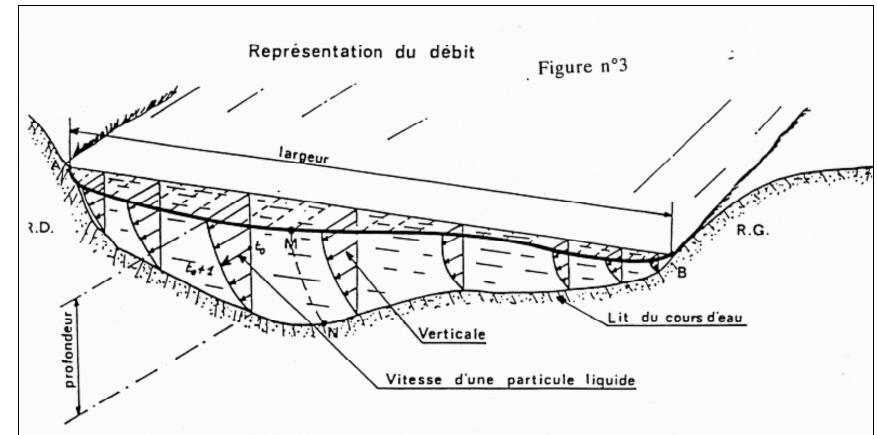
La formule générale du débit est donnée par la relation :

$$(1) Q = S \times V$$

avec Q : débit (m^3/s) S : surface de la section mouillée traversée (m^2) V : vitesse moyenne du fluide (m/s)

La vitesse V d'écoulement de l'eau n'est pas constante en tout point de la section S . Elle varie selon la position dans la section et en fonction de la nature du lit du cours d'eau (rugosité du lit, présence de végétation, d'obstacles...).

La figure suivante donne une représentation du débit Q . Le débit est égal au volume d'eau contenu dans le trièdre curviligne limité par la droite AB et les courbes AMB (enveloppe des vecteurs vitesses des particules fluides en surface) et ANB (section transversale du lit de la rivière dans la plan vertical passant par AB) pendant un temps déterminé.



Extrait de Aldegheri, M. (1979)

Supposons une surface élémentaire dS tel que $dS = dp \times dl$ avec dp élément de la profondeur et dl élément de la largeur.

En considérant la vitesse v constante au niveau de cette surface élémentaire on peut écrire le débit élémentaire sous la forme :

$$(2) dQ = v \times dS$$

Le débit total s'écrit alors :

$$(3) Q = \iint_S v dS = \iint_S v dp dl \quad \text{avec } S \text{ la surface de la section}$$

ou encore :

$$(4) Q = \int_P^L v dp \int_L dl$$

avec P la profondeur et L la largeur de la section à travers laquelle s'écoule le débit Q

Cette dernière expression (4) indique qu'il faut définir une vitesse moyenne sur toute la profondeur d'une verticale. On obtient ainsi un débit élémentaire pour chaque verticale appelé débit unitaire (pu). Ensuite par sommation de toutes les verticales (ensemble de la largeur de la rivière) on obtient le débit total.

On voit ainsi que la connaissance du débit est obtenue par la mesure des vitesses en plusieurs points au sein de l'écoulement pour définir la vitesse moyenne.

2- Les différentes méthodes de jaugeage du débit d'une rivière

Le choix d'une méthode de jaugeage sera fait en fonction du temps et du matériel dont on dispose ainsi que de la faisabilité de la manipulation (type de rivière, gamme de débit, danger pour l'hydrologue...).

Pour chaque mesure il faut vérifier que la cote de la ligne d'eau varie de manière négligeable durant le temps de la mesure

2.1- Méthode empirique par estimation de la vitesse avec un flotteur

$$(5) Q \approx k \times S \times V$$

Q : débits en m^3/s

k : coefficient correcteur en fonction des conditions locales de l'expérimentation

une valeur approximative moyenne de k est $k=2/3$

S : section mouillée en m^2

V : vitesse d'un flotteur au milieu du cours d'eau en m.s^{-1} . La vitesse est obtenue en moyennant plusieurs mesures faites à différentes distances de la berge. Le flotteur utilisé peut être le bouchon de la bouteille de vin de midi, ou des bouteilles en plastique lestées peintes en couleur vive, ou tout autre objet flottant disponible sur le terrain.

La section mouillée est obtenue en faisant le produit de la largeur de la rivière avec sa profondeur moyenne. Cette formule est très utile pour l'estimation des débits.

2.2- Jaugeage par exploration du champ des vitesses sur une section – la méthode "historique" au micromoulinet à hélice :

a) Principe :

Il s'agit de mesurer le champ de vitesse du courant sur une section transversale de rivière à différentes hauteurs. L'intégration de ce champ de vitesse sur l'ensemble de la section mouillée considérée donne le débit instantané au niveau de cette section.

b) Méthode et précautions à prendre :

Les meilleures conditions d'application sont lorsque l'on a un écoulement à filets parallèles (non turbulent) c'est à dire dans un chenal sensiblement rectiligne, de section et de rugosité régulière. Lors de la mesure de la vitesse à l'aide du micromoulinet, l'axe du micromoulinet doit être parallèle aux filets liquides sous peine de la sous-évaluation de la vitesse réelle.

On mesure la vitesse en plusieurs points de chaque verticale depuis le fond jusqu'à la surface au moyen du micromoulinet.

Parallèlement à cette exploration du champ de vitesse, on relève le profil en travers du cours d'eau en mesurant sa largeur et en effectuant des mesures de profondeur.

c) Calcul du débit instantané de la section considérée par la méthode graphique:

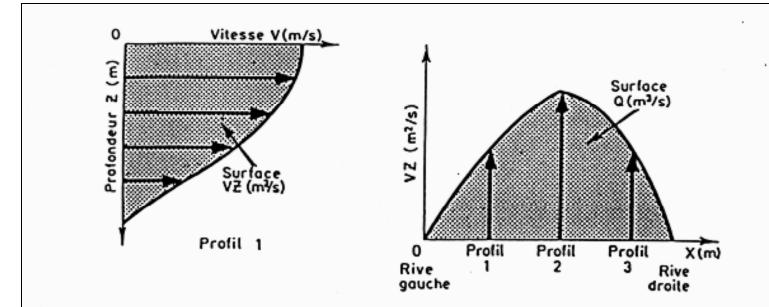
L'équation (4) explicitée au chapitre généralité est :

$$(11) Q = \int_P^L v dp \int dl$$

On trace dans un premier temps pour chaque profil vertical la courbe représentative des vitesses (m.s^{-1}) en fonction de la profondeur (m). Le planimétrage de la surface comprise sous la courbe donne le débit unitaire de la verticale du point étudié ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$).

Le débit unitaire s'exprimant : $dq = \int_P v dp$

On reporte ensuite les débits unitaires pour chaque verticale de mesure (m). Le planimétrage de la surface comprise sous la courbe donne le débit Q recherché ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$).



d) Précision de la mesure :

L'exactitude du jaugeage dépend du nombre de verticales utilisées pour mesurer la profondeur et la vitesse. De plus, la fiabilité de l'étalonnage du moulinet et les particularités de l'écoulement conditionnent eux aussi l'exactitude du jaugeage. Dans de bonnes conditions de mesure, l'incertitude est de 2% dans un canal aux parois lisses et de 5% dans une rivière naturelle

2.3- Jaugeage par la méthode du courantomètre ElectroMagnétique :

Cet appareil mesure la vitesse d'écoulement d'un fluide conducteur tel que l'eau à l'aide d'un capteur électromagnétique directionnel. Le capteur est une bobine d'induction qui crée un champ magnétique entre 2 électrodes fixes. Le déplacement de l'eau, fluide conducteur, dans ce champ produit une tension induite proportionnelle à sa vitesse (principe de Faraday).

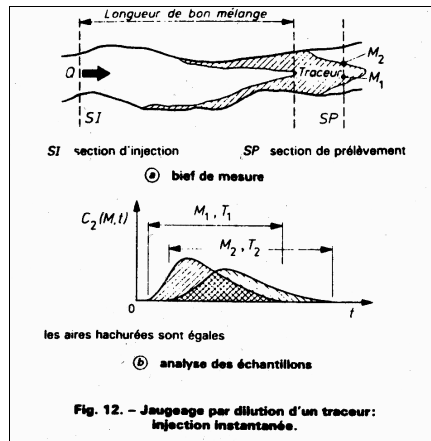
La vitesse est affichée directement sur l'appareil en m/s ou en ft/s. Elle correspond à une moyenne mesurée sur une durée variable fixée par l'utilisateur (vitesse moyennée). On peut aussi choisir d'avoir une lecture instantanée (vitesse en temps réel).

Les données de vitesses sont ensuite utilisées comme pour la méthode avec un moulinet à hélice.

2.4- Jaugeage par méthode de dilution d'un traceur (NaCl) en injection instantanée :

a) Principe :

On injecte dans la rivière une solution concentrée de sel de masse M connue et on recherche dans quelle proportion cette solution a été diluée par la rivière.



Soit M la masse de sel dans la solution concentrée, T le temps de passage du nuage salin en aval (à la longueur de bon mélange), Cm la concentration moyenne d'un échantillon global prélevé en SP obtenu pendant le temps T, Q le débit de la rivière, Ci la concentration initiale de la rivière avant l'injection, et ΔC_m l'augmentation moyenne de concentration en sel.

En considérant que la rivière a un régime permanent pendant le temps T et en considérant que la masse M de sel est conservée entre le point d'injection et le point de prélèvement (loi de conservation de la masse) on a :

$$(12) \quad M = Q \times T \times \Delta C_m \quad \text{avec} \quad \Delta C_m = C_m - C_i \quad \text{et} \quad C_m = \frac{1}{T} \int_0^T c dt$$

$$\text{d'où} \quad (13) \quad Q = \frac{M}{T \times \Delta C_m}$$

M : masse de traceur (kg) Q : débit (m³/s) T : temps de passage du nuage salin (s)
Cm : concentration moyenne (kg/m³) c : concentration à un temps t (kg/m³)

b) Evaluation de distance de bon mélange

La mesure de concentration (ici le sel, mais le traceur peut aussi être par exemple un traceur fluorescent) doit être faite à une distance ayant permis le bon mélange du traceur injecté, de manière à obtenir une concentration égale sur toute la section d'écoulement au point de mesure.

Un ordre de grandeur est donné par H. André :

Largeur de la rivière	Longueur de bon mélange
0 à 10 m	50 à 500 m
10 à 50 m	500 à 2 500 m
50 à 200 m	2,5 à 15 km

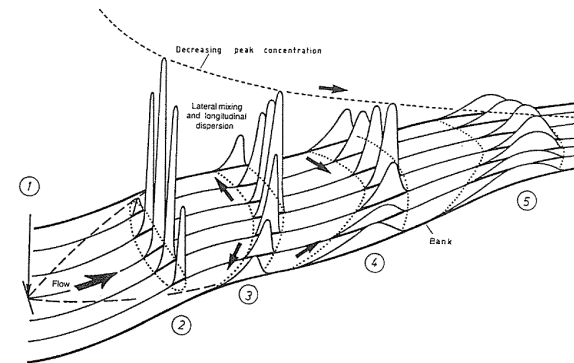


Fig. 1 Possible model of lateral and longitudinal mixing of an instantaneously injected tracer (after Hubbard et al., 1982, Kilpatrick et al., 1989).
1 = Injection point of the tracer, 2 = Tracer distribution immediately after injection, 3 = Tracer reaches banks of the channel, 4 = Backward directed flow from the banks to the center with successive lateral and longitudinal mixing, 5 = Lateral mixing is complete.

Extrait de R. BENISCHKE & T. HARUM (1990) IAHS Publ. no. 193

c) Choix du tronçon de mesure et évaluation du temps de mesure T du nuage salin

Le tronçon doit comporter le moins de zones d'eau morte possible sous peine de non conservation du traceur. Le brassage latéral est beaucoup plus difficile à obtenir que le brassage vertical, il faut donc choisir un tronçon où les coudes favorisent le renvoi des eaux de gauche à droite puis de droite à gauche. L'injection doit se faire si possible au centre de la rivière dans une zone où la vitesse du courant est fort.

Dans certains manuels, il était proposé d'injecter une petite quantité de colorant (fluorescent ou alimentaire) préalablement à la mesure réelle au sel. Cette expérience préalable avait pour but de voir visuellement le passage du nuage de traceur, et d'estimer ainsi son temps d'arrivée et de passage. Aujourd'hui, cette expérience préliminaire est déconseillée car l'injection de molécules peut perturber de futures mesures ou d'autres expérimentations en cours. De plus, la mesure de la salinité est instantanée, assurée par la mesure directe sur un conductimètre, permettant de visualiser sur l'appareil le passage du nuage salin et d'arrêter ainsi les mesures lors du retour à la concentration initiale.

d) Détermination de la masse de sel à injecter

La quantité de sel dépend du débit de la rivière. La quantité minimum de sel à utiliser est d'environ 1 kg pour 100 l/s.

Ex : si le débit est d'environ 0,2 m³/s, on dissout 2 kg de sel dans une dizaine de litres d'eau (la solubilité du NaCl dans l'eau froide est de l'ordre de 360 g/l).

e) Manipulation

On note la conductivité de la rivière avec les deux conductimètres.

On prélève en 2 endroit du lit M1 et M2 (à voir sur la figure ci-dessus) à l'aide d'un bêcher de 25 ml des échantillons toutes les 5 ou 10 secondes que l'on verse dans un large récipient (seau de 10 litres).

On note la conductivité électrique de la rivière au même pas de temps (toute les 5 ou 10 s), afin de vérifier le temps de passage du nuage salin et d'obtenir la courbe de restitution du traceur.

A la fin des prélèvements, on mesure la conductivité électrique moyenne des 2 récipients, ce qui permet de faire immédiatement le calcul du débit sur site. Les données relevées toutes les 5 ou 10 secondes seront exploitées au bureau, avec le tracé de la courbe et le calcul de la valeur moyenne de concentration.

Supposons que l'on trouve 728 et 732 $\mu\text{S}/\text{cm}$ soit une valeur moyenne de 730 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et que la conductivité de la rivière avant le prélèvement est de 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Alors, l'augmentation due au sel est de 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La relation entre l'augmentation moyenne de concentration en NaCl (ΔC_{mNaCl}) et l'augmentation moyenne de conductivité (ΔCond) est la suivante :

$$\Delta C_{\text{mNaCl}} (\text{mg/l}) = \frac{\Delta \text{Cond} (\mu\text{S/cm})}{2}$$

Cette relation nous permet d'obtenir ΔC_{m} et donc Q (équation (12)).

D'autres formules existent dans la littérature, linéaires avec un coefficient correcteur légèrement supérieur à 0,5, ou non linéaires. Pour plus de précision, il est possible d'établir la courbe exacte d'étalonnage de la conductivité électrique mesurée avec son propre appareil de terrain en fonction de la masse de sel dissoute dans l'eau; pour cela la conductivité électrique est mesurée pour des concentrations en NaCl connues.

Remerciements : ce document a été extrait et modifié du polycopié du stage de terrain de la maîtrise Sciences de la Terre, option Hydrogéologie de l'Université Paris 6, année 2001, réalisé par l'UMR Sisyphe.

Bibliographie :

Roque M. (1963) Hydrologie de Surface. ORSTOM. 431p.
http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers09-11/02081.pdf

Charte Qualité de l'Hydrométrie- Code de bonnes pratiques - 1998
<http://www.eaufrance.fr/IMG/pdf/Charte-fr.pdf>

M. ALDEGHERI (1979) Mesures des débits à partir des vitesses. Manuel d'hydrométrie tome IV. ORSTOM 313p
http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/Idt/09690.pdf

R. BENISCHKE & T. HARUM (1990) Determination of discharge rates in turbulent streams by salt tracer dilution applying a microcomputer system. Comparison with current meter measurements. IAHS Publ. no. 193, 8p.
http://iahs.info/redbooks/a193/iahs_193_0215.pdf

ANDRE Henri , AUDINET Michel, MAZERAN Georges, RICHER Claude (1976) Hydrométrie pratique des cours d'eau. Eyrolles. 259p.