

CHAPITRE IV : QUANTIFICATION DE TRANSPORT SOLIDE.

IV.1 Estimation du débit solide :

De nombreux hydrauliciens ont cherché à établir des relations permettant d'estimer le débit solide d'un cours d'eau, à partir de nombreuses mesures en modèle réduit ou sur des fleuves. Ces différentes formules donnent rarement des résultats comparables, car elles ont été établies dans des conditions différentes. Il n'y a pas de formule universelle de transport solide.

Des dizaines de formules ont été proposées depuis un peu plus d'un siècle de recherche active sur ce sujet, chacune d'entre elles ayant été établie pour des conditions hydrauliques bien particulières.

IV.1.1 Formules de transport solide :

IV.1.1.1 Charriage :

a. Meyer-Peter et Mueller [1948]:

$$q_{sch} = 8\sqrt{g(d_s - 1)d^3}(\beta\tau^* - \tau_{cr}^*)^{3/2}$$

Avec :

q_{sch} : Débit solide unitaire par charriage ;

d_s : Densité spécifique : $d_s = \gamma_s / \gamma_e$;

β : Paramètre adimensionnel : $\beta = \left(\frac{K_f}{K_{grains}}\right)^{3/2}$;

τ^* : Paramètre de Shields ;

τ_{cr}^* : Paramètre de Shields critique :

- Granulométrie uniforme $\tau_{cr}^* = 0.047$ et $d = d_{moy}$

- Granulométrie étalée a fond sans ondulations $\tau_{cr}^* = 0.138$, $\beta = 1$ et $d = d_{50}$

Conditions de validité :

- ✓ Ecoulement uniforme ;
- ✓ $0.01(m) < h$: tirant d'eau $< 1.2(m)$;
- ✓ $0.04\% < i$: pente du lit $< 2\%$;
- ✓ $0.4(mm) < d$: diamètre des gains $< 30(mm)$;
- ✓ Granulométrie uniforme ;
- ✓ $\tau^* < 0.25$: charriage (Ramette, 1981).

b. Brown-Einstein (1950) :

$$\frac{q_{sch}}{\sqrt{g(d_s - 1)d^3}} = f\left(\frac{\gamma_s - \gamma_e}{\tau} d\right)$$

Cette équation est complexe et nécessitant des abaques a été lissée par Brown (1950) sous la forme :

$$q_{sch} = \sqrt{g(d_s - 1)d^3} \left(\left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{g(d_s - 1)d^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{g(d_s - 1)d^3}} \right) f(\tau^*) \right)$$

$$\text{Avec : } f(\tau^*) = \begin{cases} 2,15e^{-\frac{0,391}{\tau^*}} & \text{si } \tau^* < 0,182 \\ 40\tau^{*3} & \text{si } \tau^* > 0,182 \end{cases}$$

Le diamètre caractéristique est donné par : $d = d_{\text{moyen}}$ (uniforme) et $d = d_{50}$ (étalée).

Condition de validité : $0.3(\text{mm}) < d < 29 (\text{mm})$.

c. Schoklitsch (1962) :

On définit un débit critique d'érosion q_{cr} : $q_{cr} = 0,26(d_s - 1)^{5/3} \frac{d^{3/2}}{i^{7/6}}$

Le charriage est alors donné par : $q_{sch} = \frac{2,5}{d_s} (q - q_{cr}) i^{3/2}$

Avec

q : est le débit liquide unitaire $q = Q/b$.

Le diamètre caractéristique est donné par :

- Granulométrie uniforme : $d = d_{\text{moyen}}$;
- Granulométrie étalée : $d = d_{40}$ (Brathurst et al , 1987).

IV.1.1.2 Suspension :

Méthode approchée : La relation du débit solide en suspension est exprimée par la formule :

$$Q_{ss} = Q_l \cdot C$$

Avec :

Q_{ss} : le débit solide en suspension

Q_l : le débit liquide

C : concentration de matériaux en suspension.

- Détermination de la concentration des matériaux en suspension C :

a. Formule d' Abalianz (1958):

$$C = 26 \cdot \frac{U}{h^{3/4} V_{ss}}$$

C : Valeur moyenne du taux de concentration des matériaux (g/l).

U : Vitesse moyenne de l'écoulement (m/s).

V_{ss} : Vitesse de décantation des grains dans l'eau (m/s).

h : hauteur du liquide (m).

b. Formule d'Obrien (1933) :

Cette formule s'appuie sur le fait que le taux de concentration dépend directement de la côte Z des points de prélèvement.

$$\frac{C}{C_0} = \left[\frac{h - Z}{Z} \frac{Z_0}{h - Z_0} \right]^{\frac{w}{K u^*}}$$

Avec :

C : taux de concentration volumique à la côte Z (g/l).

C_0 : taux de concentration volumique à la côte Z_0 (g/l).

h : hauteur du liquide (m).

K : constante universelle de Karman.

V_{ss} : vitesse de sédimentation (m/s).

u^* : vitesse de frottement (m/s).

c. D'après Einstein :

$$q_{ss} = 0.667 \sum \Delta q_{ssi} \quad \text{Avec} \quad Q_{ss} = q_{ss} \cdot b$$

b : Largeur du cours d'eau

q_{ssi} : Débit solide en suspension pour un tronçon i ($m^3/s.ml$).

Q_{ss} : Débit solide en suspension total (m^3/s).

IV.1.1.3 Transport solide totale:

Connaissant le débit solide par charriage et en suspension on peut estimer le transport solide total par la formule :

$$Q_{sT} = Q_{ss} + Q_{sch}$$

Avec :

Q_{sT} : Débit solide totale ;

Q_{ss} : Débit solide en suspension ;

Q_{sch} : Débit solide en charriage.

Ou bien utiliser l'une des formules suivantes :

a. Engelund et Hansen (1967) :

$$q_{sT} = 0,05 \sqrt{g(d_s - 1)d^3} \left(\frac{K_s^2 R_h^{1/3}}{g} \right) \tau^{*5/2}$$

Le diamètre caractéristique est donné par : $d = m_{oyen}$ (uniforme) et $d = d_{50}$ (étalée).

Condition de validité :

- Pente faible ;

- $0.15 \text{ (mm)} < d < 1.6 \text{ (mm)}$.

b. Graf et Acaroglus (1968) : définissent un paramètre d'intensité de frottement ψ_A comme critère de transport solide et mettant en évidence qu'il est lié a un paramètre de transport Φ_A .

$$\psi_A = (\tau^*)^{-1} = \frac{(d_s - 1)d}{R_h i} \quad \phi_A = \frac{(q_{sT}/q)UR_h}{\sqrt{g(d_s - 1)d^3}} \quad \phi_A = f(\psi_A)$$

Avec :

U : la vitesse d'écoulement ;

R_h : le rayon hydraulique ;

De manière expérimentale, ils établissent par suite que :

$$\phi_A = \alpha \psi_A^{-\beta} = 10,39 \psi_A^{-2,52} \Rightarrow q_{sT} = 10,39 g^{0,5} \frac{h R_h^{1,52} i^{2,52}}{(d_s - 1)^{2,02} d^{1,02}}$$

Le diamètre caractéristique est donné par : $d = d_{moyen}$ (uniforme) et $d = d_{50}$ (étalée).

Conditions de validité : $0.3 \text{ (mm)} < d < 1.7 \text{ (mm)}$.

c. Ackers et White (1973) :

On définit le terme F_{gR}

$$F_{gR} = \frac{1}{\sqrt{g(d_s - 1)d}} \left(\frac{U}{\sqrt{32} \log \left(10 \frac{h}{d} \right)} \right)$$

Le transport total est alors :

$$q_{sT} = 0,025 q \frac{d}{h} \left(\frac{F_{gR}}{0,17} - 1 \right)^{1,5}$$

Le diamètre caractéristique est donné par : $d = d_{moyen}$ (uniforme) et $d = d_{35}$ (étalée).

Conditions de validité : Nombre de Froude $F_r < 0.8$ (Bathurst et al, 1987) et $0.04 \text{ (mm)} < d < 4 \text{ (mm)}$.

NB : $Q_{sT} = q_s b$. Débit solide total vides non compris

$$\overline{Q}_{sT} = \frac{Q_{sT}}{1 - n}$$
 Débit solide total vides compris

Avec : n : la porosité, en général n est proche de $0,3$.

IV.2 Vitesse de début d'entraînement :

La vitesse qui provoque le début de mise en mouvement (par charriage) est appelée vitesse de début d'entraînement V_0 :

$$V_0 = 2,7 K^{1/4} \cdot h^{1/6} \cdot d^{3/8}$$

Où : - K : est le coefficient de Strickler global ;

- h : le tirant d'eau ;

- d : le diamètre moyen des grains.

Dans le cas où $\beta = 1$, $K_f = \frac{21}{d^{1/6}}$ et la formule devient très simple : $V_0 = 5,8 \cdot h^{1/6} \cdot d^{1/3}$

IV.3 profondeur des fonds perturbés :

Suite à des travaux de Izard et Bradley (1958), puis à des essais au LNH de Chatou, Ramette propose une formule de profondeur maximale des fonds perturbés (ou susceptibles d'être affouillés) au voisinage de rétrécissements locaux.

$$f_p = \frac{0,73 \cdot q^{2/3}}{d^{1/6}}$$

Où :

f_p : profondeur des fonds perturbés par rapport à la ligne d'eau correspondant au débit Q ;

q : Q/L débit liquide par unité de largeur en $m^3/s/m$;

d : diamètre moyen des sédiments, en m.

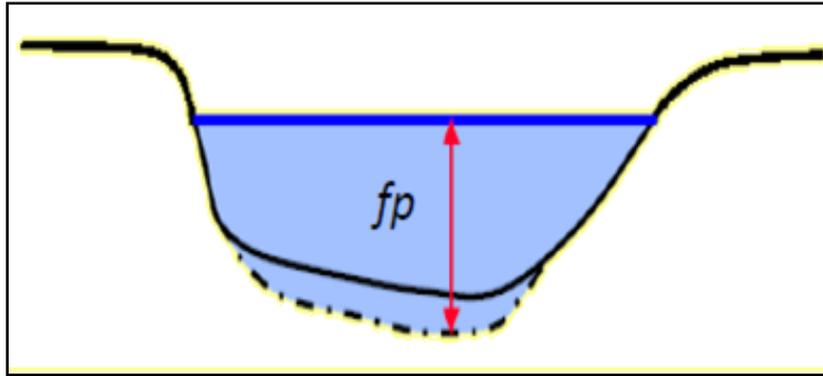


Fig. IV.1 : Profondeur des fonds perturbés.

Ce calcul est intéressant pour le calcul des protections des ouvrages non fondés au substratum rocheux (culées ou piles de ponts).

La formule conduit à des profondeurs importantes pour des rivières à sable, mais dans le cas des rivières pavées, cette formule n'a de sens que pour des débits suffisamment forts pour rompre la protection de peau assurée par le pavage.

IV.4 Mesure du débit solide :

IV.4.1 Mesure du charriage :

➤ Principe :

- Mesurer les dépôts dans un secteur qui naturellement piège les sédiments charriés.
- Mesure des volumes de dépôts effectués par suivi bathymétrique
- Possibilité d'utiliser les structures existantes (Barrages ou anciennes fosses d'extraction)
- Alternativement, construire des fosses à piégeage dans le lit mineur.
 - Risque d'érosion progressive : à implanter donc dans une zone sans enjeux particuliers ;
 - Après chaque mesure, effectuer des curages

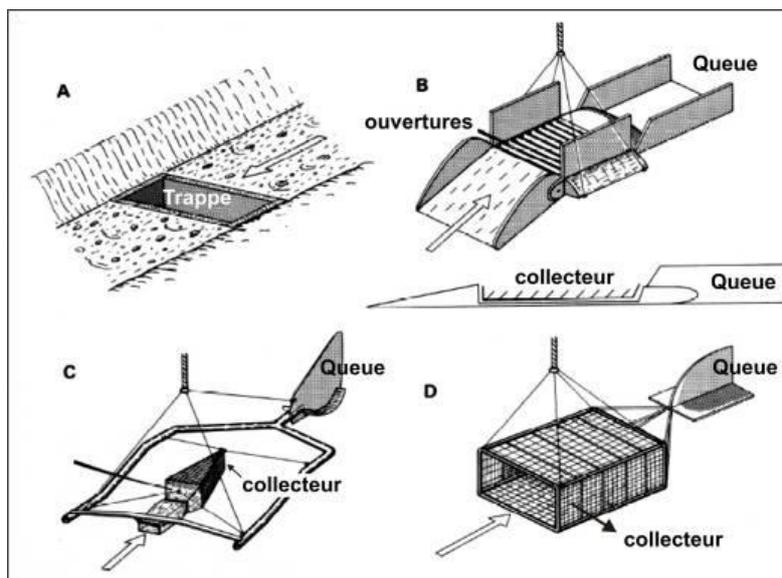


Fig.IV.2 : Pièges à sédiment.

➤ Equipements d'échantillonnage :

* **Préleveur Helley-Smith:**

- Préleveur le plus connu et répandu ;
- Modèles variant suivant la taille des grains à échantillonner ainsi que la vitesse de l'écoulement.



Fig. IV.3 : Préleveur Helley-Smith

* **Autres échantillonneurs:**

Bedload Transport Meter Arnhem (BTMA), développé aux Pays-Bas et *Karolyi*, développé en Hongrie



Figure IV.4 : Echantillonneurs : BTMA et Karolyi.

IV.4.2 Prélèvement de la suspension :

*** Bouteille verticale type Punjab (pas isocinétique) :**

- Utilisable pour des sédiments très fins
- Facilité d'emploi
- Demande malgré tout un soin particulier (maintenir le bouchon fermé jusqu'à la profondeur de prélèvement).



Fig. IV.5 : Bouteille verticale type Punjab.

*** Bouteille de Delft suspendue :**

- Bouteille de Delft type labyrinthe (« filtre l'eau ») qui retient le sable d'un diamètre supérieur à 50 microns ;
- Ne nécessite pas la mesure de la vitesse de l'eau car on mesure directement le taux de transport solide ;

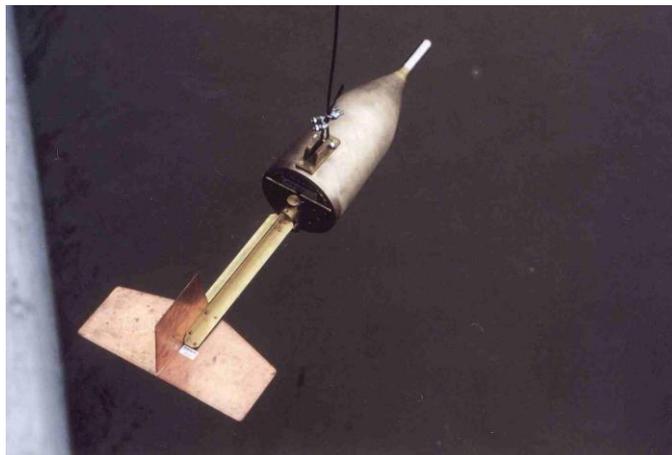


Figure IV.6 : Bouteille de Delft suspendu.

* **La bouteille de Delft sur chariot** permet la mesure de saltation et suspension à différentes hauteurs d'eau entre 0,05 [m] et 0,5 [m] au dessus du fond.

- Il est adapté aux cours d'eau dont les alluvions sont composées de sables et graviers fins.
- L'appareil est conçu de façon à ce que l'écoulement et le transport des matériaux solides ne soient pas perturbés : c'est une caractéristique propre à cet équipement.



Fig. IV.7 : Bouteille de Delft sur chariot

* **Bouteille de Delft éprouvette**

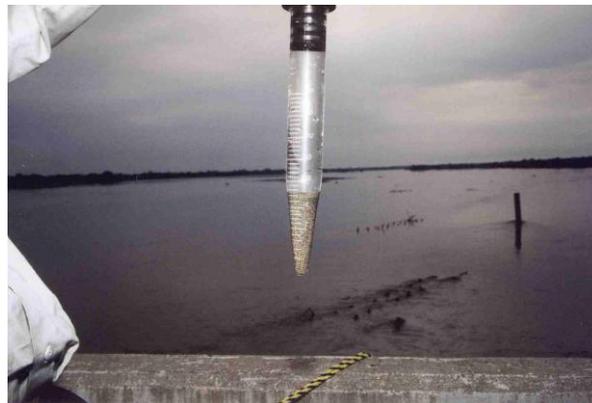


Fig. IV.8 : Bouteille de Delft éprouvette.