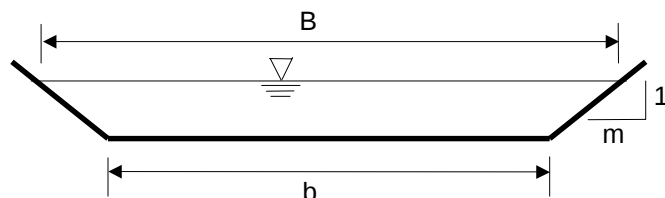


EXERCICE 1

Transport solide par charriage

Le Rhône en aval de la ville de Sion peut être modélisé par un canal trapézoïdal dont les caractéristiques sont les suivantes:



plafond	$b = 55 \text{ m}$
pente des berges	$m = 1.5$
pente longitudinale	$J_f = 0.3\%$
rugosité de la section	$K = 30 \text{ [m}^{1/3}\text{/s]}$
granulométrie des matériaux du lit	$d_m = 8 \text{ mm}$
	$d_{90} = 14 \text{ mm}$

Question 1: Pour le débit de pointe de la crue d'octobre 2000, $Q = 920 \text{ m}^3/\text{s}$, calculez:

— la hauteur normale de l'écoulement:

— le régime d'écoulement:

Question 2: Comparez le transport solide par charriage obtenu à l'aide des deux formules suivantes, pour le débit de pointe de $920 \text{ m}^3/\text{s}$ et dessinez la fonction de charriage (couche de pavage détruite) $Q_s = f(Q)$:

Smart & Jaeggi:

$$q_s = 2.5 \cdot J^{0.6} \cdot q \cdot \left(J - \frac{d_m}{12.1 \cdot h} \right)$$

Schoklitsch:

$$q_s = \frac{2.5}{s} \cdot J^{1.5} \cdot [q - q_c] \quad \text{où } q_c = g^{0.5} \cdot d_r^{1.5} \cdot 0.21 \cdot J^{-1.12}$$

avec: q_s : débit solide unitaire [m^2/s] $q_s = \frac{Q_s}{b}$

q : débit liquide unitaire [m^2/s] $q \approx \frac{Q}{b}$

q_c : débit liquide critique unitaire de charriage [m^2/s]

J : pente de frottement [-]

h : hauteur d'eau [m]

d_r : d_{16} ou $0.8 \cdot d_m$ [m]

s : densité spécifique $s = \frac{\rho_s}{\rho} = 2.65$

— Smart & Jaeggi : $q_s = \dots\dots\dots$

$Q_s = \dots\dots\dots$

— Schoklitsch: $q_s = \dots\dots\dots$

$Q_s = \dots\dots\dots$

Question 3: Déterminez, à l'aide de la formule Smart & Jaeggi, le débit critique unitaire q_{cr} et total Q_{cr} de charriage:

a) pour le cas d'une couche de pavage détruite

b) pour le cas d'une couche de pavage intacte avec $d_{mpavage} = d_{90}$

— a) : $q_{cr} = \dots\dots\dots$
 $Q_{cr} = \dots\dots\dots$

— b) : $q_{cr} = \dots\dots\dots$
 $Q_{cr} = \dots\dots\dots$

Question 4: Quel serait le diamètre moyen d'une couche de pavage qui résisterait jusqu'à un débit de $300 \text{ m}^3/\text{s}$:

— Diamètre moyen :... ..

Question 5: Dans un tronçon considéré, l'apport amont de matériaux est interrompu à cause du dragage de graviers. Dans ce tronçon, le débit de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (légèrement supérieur au débit moyen annuel) peut être considéré comme le débit d'équilibre formant le lit ou la pente du fond.

a) Quelle est la pente d'équilibre qui s'établira après un certain temps avec ce débit, en admettant une couche de pavage ?

b) Par comparaison à la pente actuelle de 0.3%, dans quel état le Rhône se trouve-t-il ?

c) A quel changement de niveau du lit doit-on s'attendre entre deux points fixes distants de 2 km ?

— a) : $J_e = \dots\dots\dots$

— b) :

— c) :

Réponse 1: La hauteur normale est obtenue par application de la formule de Manning-Strickler:

$$Q = S \cdot K \cdot R_h^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (1)$$

pour une section trapézoïdale

$$S = (b + m \cdot h) \cdot h$$

$$R_h = \frac{(b + m \cdot h) \cdot h}{b + 2 \cdot h \sqrt{1 + m^2}}$$

La détermination du nombre de Froude permet de définir le régime d'écoulement:

$$F^2 = \frac{Q^2}{g \cdot S^3} \frac{dS}{dh} \quad (2)$$

pour une section trapézoïdale

$$\frac{dS}{dh} = B$$

où $B = b + 2 \cdot m \cdot h$ (miroir)

Pour $Q = 920 \text{ m}^3/\text{s}$: $h_N = 3.98 \text{ m}$ $F = 0.64 \Rightarrow$ régime fluvial

La figure 1 représente l'évolution de la hauteur normale, la vitesse moyenne et le nombre de Froude de l'écoulement en fonction du débit.

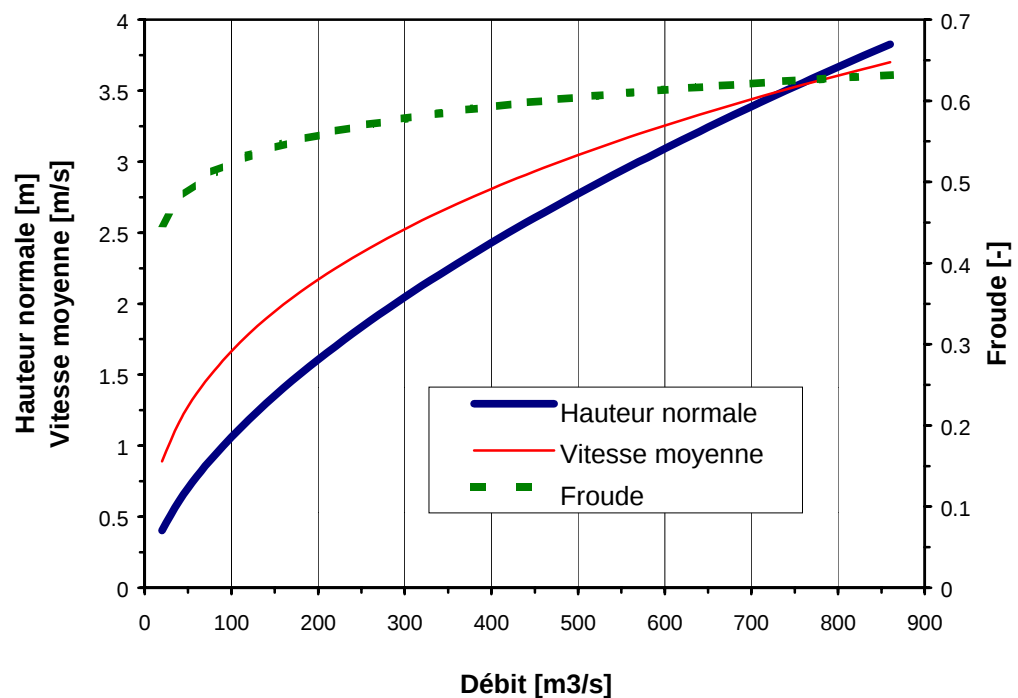


Figure 1: Le Rhône à l'aval de Sion: évolution des grandeurs caractéristiques de l'écoulement en fonction du débit.

Réponse 2: Les fonctions de charriage (couche de pavage détruite) correspondant aux formulations sont représentées sur la figure 2.

$$\text{Smart \& Jaeggi: } Q_s = 2.5 J^{0.6} Q \left(J - \frac{d_m}{12.1h} \right)$$

$$\text{Schoklitsch: } Q_s = \frac{2.5}{s} J^{1.5} (Q - q_c \cdot b)$$

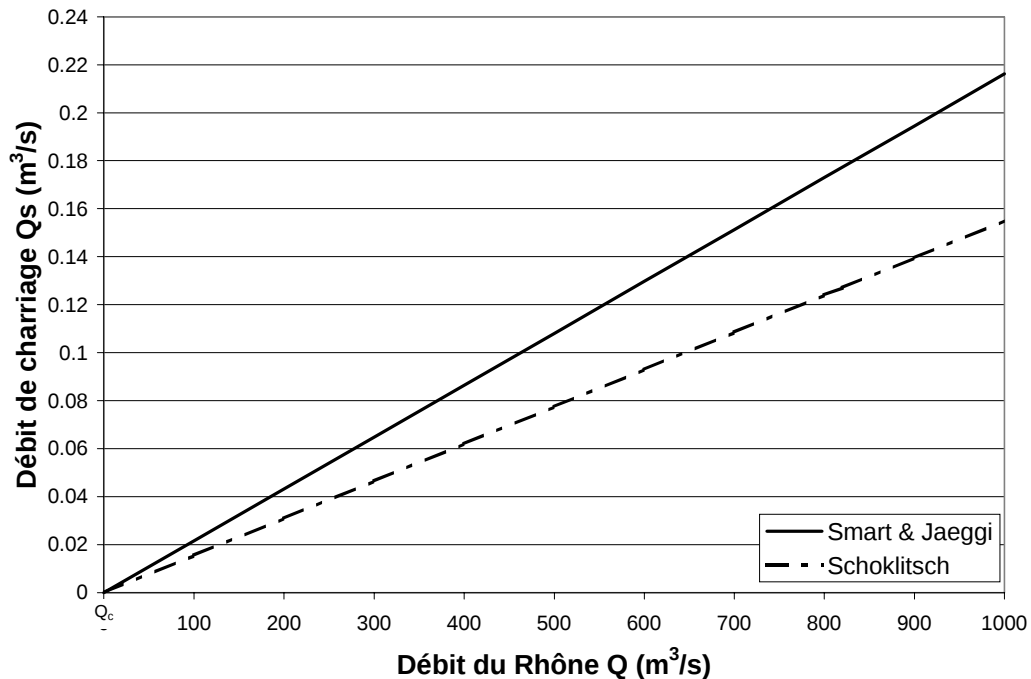


Figure 2: Evolution du débit de charriage en fonction du débit liquide

Pour $Q=920 \text{ m}^3/\text{s}$, l'application des formules donne:

$$\text{Smart \& Jaeggi: } q_s = 0.00363 \text{ m}^2/\text{s} \quad Q_s = 0.200 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Schoklitsch: } q_s = 0.00256 \text{ m}^2/\text{s} \quad Q_s = 0.141 \text{ m}^3/\text{s}$$

L'application des deux formules de charriage conduit à une différence de l'ordre de 30% sur le débit solide unitaire. Ces résultats doivent être interprétés comme étant des ordres de grandeur du transport solide par charriage dans le Rhône correspondant aux alluvions de surface.

Réponse 3: Le débit critique de charriage est obtenu en posant le débit solide $q_s = 0$. Dans la formule de Smart & Jaeggi cela se traduit par:

$$J - \frac{d_m}{12.1 \cdot h} = 0$$

a) Si la couche de pavage est détruite, $d_m = 8 \text{ mm}$

$$\Rightarrow h = 0.22 \text{ m}$$

En appliquant cette valeur à l'équation de Manning-Strickler :

$$\Rightarrow Q_c = 7.27 \text{ m}^3/\text{s} \quad \Rightarrow q_c = 0.132 \text{ m}^2/\text{s}$$

b) Si la couche de pavage est intacte, $d_m = d_{90} = 14 \text{ mm}$

$$\Rightarrow h = 0.39 \text{ m}$$

$$\Rightarrow Q_c = 18.5 \text{ m}^3/\text{s} \quad \Rightarrow q_c = 0.336 \text{ m}^2/\text{s}$$

Réponse 4: La résistance du pavage pour un débit de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ implique que $q_s = 0$

$$\Rightarrow J - \frac{d_{90}}{12.1 \cdot h} = 0$$

La hauteur d'eau normale pour un tel débit est calculée par Manning – Strickler :

$$\Rightarrow h = 2.05 \text{ m}$$

$$\Rightarrow d_{90} = 7.4 \text{ cm}$$

d_{90} correspond au d_m de la couche de pavage artificiel.

Remarque : la formule de Smart & Jaeggi s'exprime plus généralement par :

$$q_s = \frac{4.2}{s-1} J^{1/6} \left(1 - \frac{\theta_{cr}(s-1)d_m}{hJ} \right)$$

avec : s : densité spécifique

θ_{cr} : contrainte de cisaillement critique adimensionnelle (définition selon Shields)

$d_m = d_{90}$ pour une couche de pavage intacte.

La formulation proposée à la question 2 correspond au cas $\theta_{cr} = 0.05$ et $s = 2.65$.

Mais pour que le pavage et **la totalité de la granulométrie** du lit résiste au débit, le diagramme de Shields propose un **$\theta_{cr} = 0.03$ (aucun mouvement)**. Dans cette condition extrême et pour $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$:

$$\Rightarrow d_{90} = d_{\text{mpavage}} = 12.4 \text{ cm} \text{ (40 \% plus grand)}$$

Par conséquent, pour éviter l'érosion du lit en l'absence d'un apport solide amont, le lit doit être renforcé par une couche de pavage artificiel de $d_m = 12.4 \text{ cm}$.

Réponse 5: Dans le tronçon considéré, étant donné que l'apport de sédiments est interrompu, l'équilibre s'établit après un certain temps, le débit de charriage devenant nul.

a) La pente d'équilibre est donc atteinte pour :

$$\begin{cases} J_{\epsilon} = \frac{d_{90}}{12.1h} \\ Q_{\epsilon} = SKR_h^{2/3} J_{\epsilon}^{1/2} \end{cases} \quad \text{avec } Q_{\epsilon} = 150 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Rightarrow h = 2.31 \text{ m}$$

$$\Rightarrow J_{\epsilon} = 0.05\%$$

b) La pente actuelle est plus raide que la pente d'équilibre, par conséquent, le Rhône dans le tronçon considéré s'érode.

c) Sur le tronçon de 2 km :

$$\Delta z_{\epsilon} = 2000 J_{\epsilon} = 1 \text{ m} \text{ (différence d'altitude du fond du lit sur le tronçon pour la pente d'équilibre)}$$

$$\Delta z = 2000 J = 6 \text{ m} \text{ (actuellement)}$$

Il faut donc s'attendre à un changement de dénivellation de l'ordre de **5 m**.

Le transport solide, résumé

Le transport de sédiments par les écoulements est un phénomène déterminant de la morphologie des réseaux naturels d'évacuation des eaux. Il en résulte que toute intervention susceptible de modifier le régime hydrologique ou le lit d'un cours d'eau se doit d'être examinée en regard des processus d'érosion, de transport solide et de déposition.

La puissance nécessaire au transport est prélevée sur la charge de l'écoulement et met en jeu deux types de mécanismes:

- le charriage: les matériaux roulent, glissent et sautent sur le fond sans "pratiquement" quitter le lit,
- la suspension: les matériaux restent dans l'écoulement, malgré leur densité supérieure à celle de l'eau.

La répartition complexe entre ces deux types de transport dépend essentiellement de la dimension et du poids spécifique des sédiments ainsi que de la vitesse et de la turbulence de l'écoulement. De manière générale, le profil en long des cours d'eau résulte essentiellement du processus de charriage par le fait que les matériaux transportés restent en contact avec le fond du lit.

Les phénomènes de frottement et de butée réciproque des granulats font que le charriage n'intervient qu'à partir d'une certaine force critique du courant. La détermination de cette condition critique marquant le début du charriage est abordée de différentes manières en s'appuyant sur:

- la vitesse moyenne de l'écoulement, à l'exemple du diagramme de HJULSTROM (1935) établi pour des matériaux non cohésifs, à granulométrie homogène;
- la tension de frottement exercée par le fluide sur les matériaux du lit, à l'exemple du diagramme de SHIELDS (1936) établi également pour des matériaux non cohésifs.

Pour la quantification du charriage, la littérature propose une large palette de relations où le débit solide est exprimé essentiellement selon trois approches différentes:

- formulation de type du Boys, en référence à la tension de frottement,
- formulation de type Schoklitsch, en référence au débit,
- formulation de type Einstein, basée sur des considérations statistiques de la portance.

Les coefficients de ces formules sont calés sur des résultats expérimentaux. Leur application à des situations réelles implique le respect de leur domaine de validité. Dans ce contexte, le choix de la "meilleure" formule de transport solide pour un cas de figure donné revêt une importance capitale.