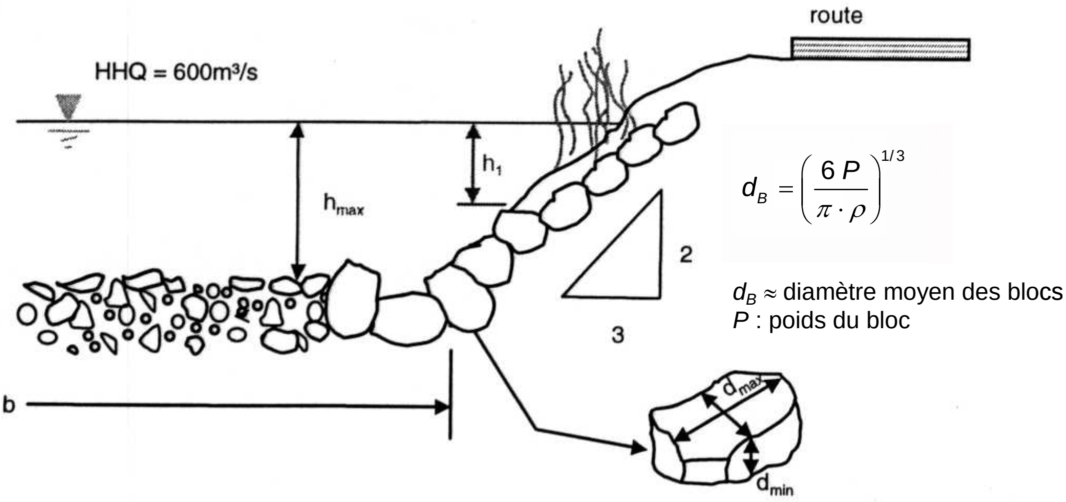
EXERCICE 2

Stabilisation des berges en enrochements

La berge d'un torrent de montagne qui s'écoule le long d'une route importante doit être protégée par des enrochements pour prévenir l'érosion latérale menaçant la route. Le cours d'eau peut être modélisé par une section trapézoïdale dont les caractéristiques sont:

- Plafond: $b = 25$ m
- Pente des berges: $m = 1.5$ (3.0 horiz./2.0 vert.)
- Pente longitudinale: $J = 3\%$
- Granulométrie de la sous-couche du lit: $d_{m\ US} = 0.4$ m; $d_{90\ US} = 1.30$ m

La crue maximale observée est caractérisée par un débit de pointe HHQ = 600 m^3/s. Cette crue a provoqué l'érosion latérale du lit jusqu'à la route.



Question 1: En admettant un écoulement uniforme, déterminer la hauteur maximale de l'écoulement. La rugosité du lit peut être estimée par la relation empirique

$$K = 0.75\ K_r = 0.75 \cdot \frac{26}{d_{mDS}^{1/6}} \qquad et \quad d_{mDS} \approx d_{90US}$$

Question 2: Déterminer la contrainte de cisaillement maximale τ_{max} agissant sur les berges au pied du talus. Choisir la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique pour le dimensionnement des berges (torrent de montagne).

Question 3: Selon la procédure de dimensionnement de Stevens et al. quel est le diamètre moyen d_B et le poids des blocs nécessaires? Le facteur de sécurité souhaité pour la stabilité de la berge est S = 1.3 (en admettant un angle de talus d'enrochement stable, sans écoulement, de $\varphi = 55°$ pour P > 1t)

Question 4: Depuis quelle profondeur d'écoulement h_1 serait-il possible d'utiliser des blocs de 1 tonne? ($\varphi = 45°$ pour P < 1t)

Question 5: Quels sont les problèmes qui se posent si le tronçon de berge est à l'extérieur d'une courbe?

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

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

pour une section trapézoïdale

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

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

Le coefficient de Strickler est défini ici par la relation suivante :

$$K = 0.75 \frac{26}{d_{mDS}^{1/6}} \quad \text{avec} \quad d_{mDS} \approx d_{90US} \tag{2}$$

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

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

pour une section trapézoïdale

$$\frac{dS}{dh} = B \qquad \text{où } B = b + 2 \cdot m \cdot h \text{ (miroir)}$$

Pour Q= 600 m^3/s et d_{90US}=1.30m: **h_N = 3.25 m** **F = 1.18 régime torrentiel**

Réponse 2: La contrainte de cisaillement maximale agissant sur les berges au pied du talus se calcule comme :

$$\tau_{R\,max} = 0.77 \cdot \rho g h \cdot J = 0.227 \cdot h_{max} \tag{3}$$

avec h= h_N= 3.25 m : τ_{Rmax}= 0.736 kN/m^2

Pour un torrent de montagne, la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique vaut : θ_{cr}= 0.1

Réponse 3: Selon Stevens et al., le dimensionnement des blocs se fait de la manière suivante :
Contrainte de cisaillement adimensionnelle θ:

$$\theta = \frac{\tau_{R\,max}}{\rho g(s-1)d_B} = 0.014 \cdot \frac{h}{d_B} \tag{4}$$

où d_B : diamètre des blocs

avec s= 2.65 :

Facteurs de dimensionnement θ et η:

$$\eta = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = 0.14 \cdot \frac{h}{d_B} \tag{5}$$

$$\xi = \eta \cdot \frac{S_m}{\cos\alpha} = 0.14 \cdot \frac{h \cdot \tan\varphi}{d_B \sin\alpha} \qquad \text{avec } S_m = \frac{\tan\varphi}{\tan\alpha} \tag{6}$$

où α : angle du talus avec l'horizontale
φ : angle d'un talus d'enrochements stable sans écoulement

Ici : $\tan\alpha = 2/3$ d'où $\alpha = 33.7°$

Etude de sensibilité : φ = 45, 50, 55, 60°

Facteur de sécurité : S= 1.3

$$S = \frac{S_m}{2}\left(\sqrt{\xi^2 + 4} - \xi\right) \tag{7}$$

La masse des blocs vaut :

$$M = \rho_s \cdot \frac{\pi d_B^3}{6}$$ avec ρ_s =2.65 t/m^3

Résultats pour h= 3.25 m:

φ [°]	d_B [m]	M [t]
45	2.85	32.1
50	1.50	4.7
55	1.13	2.0
60	0.95	1.2

Compte tenu de la masse des blocs, nettement supérieure à 1t, un angle φ = 55° peut être admis ici.

Réponse 4: Un bloc dont la masse est de 1t a un diamètre de 0.6 m

Selon (7), les résultats suivants sont obtenus pour la profondeur admissible d'écoulement h_1 :

φ [°]	h_1 [m]
45	1.03
50	1.95
55	2.60
60	3.10

Pour des blocs de 1t, un angle φ = 45° doit être considéré.

Réponse 5: A l'extérieur d'une courbe, l'érosion du lit peut déstabiliser la fondation de l'enrochement.

L'approfondissement a aussi pour conséquence d'augmenter la contrainte de cisaillement.

Les blocs de pied devront être enfouis en tenant compte de la profondeur d'affouillement attendue (profondeur minimale de la fondation: 1 à 2 fois le diamètre du bloc de pied).