

**Chapitre III**  
**Transport solide dans les cours d'eau**

## I. PROPRIETES PHYSIQUES ET HYDRAULIQUES DES SEDIMENTS

### I. Propriétés physiques des sédiments

Du fait que les sédiments ne possèdent pas des formes ordinaires, ils sont étudiés par l'introduction d'un diamètre équivalent qui se définit comme suit:

- Le diamètre d'une sphère ayant le même volume que la particule ;
- La longueur minimale d'un crible carré à travers lequel la particule peut passer ;
- Le diamètre d'un sédiment sphérique ayant la même vitesse terminale de chute dans l'eau à 24 °C

En plus du diamètre, la forme de la particule est prise en considération par l'introduction d'un coefficient de forme qui se définit comme suit :

$$k_f = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (1)$$

Tel que,

$a$  : la dimension la plus grande du sédiment ;

$b$  : la dimension intermédiaire du sédiment ;

$c$  : la dimension la plus petite du sédiment ;

Ce coefficient est toujours inférieur à 1, il est généralement de l'ordre de 0.7 pour les graviers.

Pour étudier un mélange de particules solides on définit les paramètres suivants :

### *La répartition granulométrique*

Elle sert à déterminer la répartition en poids des tailles des particules dans un mélange de sédiments. Le poids de chaque classe de grains est déterminé à partir des résultats de tamisage pour des diamètres supérieurs à 100  $\mu\text{m}$  et par l'essai de sédimentométrie pour des diamètres inférieurs. Par ailleurs, on peut tracer une courbe granulométrique du mélange qui lie chaque diamètre  $d_y$ , au poids  $y$  des particules de cette taille ou de taille inférieure, ce poids est indiqué en pourcentage au poids total de la matière sèche du mélange étudié.

Pour définir un diamètre représentatif d'un mélange, on choisit souvent  $d_{50}$ ,

En général, un seul diamètre ne peut pas représenter parfaitement un mélange, d'où l'introduction des coefficients qui identifient l'uniformité de la granulométrie :

Le coefficient d'uniformité est généralement donné par la formule suivante

$$\varphi = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \quad (2)$$

Ou plus universellement, par le coefficient d'uniformité de Hasen donné comme :

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3)$$

La masse volumique des particules solides  $\rho_s$  est définie comme étant le rapport de la masse des particules  $W_s$  sur leur volume  $V_s$ .

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (4)$$

$\rho_s$  : est de l'ordre de 2650 kg/m<sup>3</sup>;

Pour prendre en considération la porosité, on définit la masse volumique apparente  $\rho_a$  comme étant le rapport de la masse des particules solides  $W_s$  au volume apparent  $V_{ap}$

$$\rho_{ap} = \frac{W_s}{V_{ap}} \quad (5)$$

La porosité est le rapport entre le volume des vides  $V_v$  et le volume total du mélange  $V_t$

$$p_0 = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_v}{V_t + V_s} \quad (6)$$

Par contre l'indice des vides se définit comme suit :

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (7)$$

## II. Propriétés hydrauliques des sédiments

La vitesse de chute des sédiments dans l'eau calme est un paramètre très important dans l'étude de la dynamique fluviale. C'est la vitesse de chute terminale en eau distillée calme sans aucune influence de la paroi ou d'autres particules.

Lorsqu'une particule sphérique tombe dans l'eau calme, sa vitesse se stabilise après une certaine transition; elle est donc sous l'action d'une résultante de forces nulle; ces dernières sont le poids de la particule, la poussée d'Archimède et la force de traînée associée au mouvement.

Une particule solide dans son parcours de chute est soumise à deux forces verticales : son poids sous l'eau qui résulte du poids et la poussée d'Archimède, et la force de traînée

Le poids

$$W_s = (\rho_s - \rho) g k_1 d^3 \quad (8)$$

La force de traînée

$$F_T = C_d \rho k_2 d^2 \frac{V_c^2}{2} \quad (9)$$

Tel que  $k_1$  et  $k_2$  sont des coefficients de forme,  $C_d$  coefficient de traînée,  $d$  est le diamètre du sédiment.

Dans le cas d'un régime laminaire ( $Re = V_c d / \nu$ ) < 1, Stokes a exprimé la force de traînée d'une particule sphérique par une solution des équations de Navier-Stokes sans le terme d'inertie, le coefficient de traînée résultant est donné par :

$$C_d = \frac{64}{Re} \quad \text{Équivalent à } V_c = \frac{(\rho_s - \rho)gd^2}{18\mu} \quad (10)$$

En régime turbulent ( $Re > 1$ ) la vitesse de chute s'écrit :

$$V_c = \sqrt{\frac{4}{3} gd \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \frac{1}{C_d}} \quad (11)$$

Plusieurs formules sont proposées pour le calcul du coefficient de traînée en régime turbulent,

On cite la formule de

Cheng 1997 qui propose de calculer  $C_d$  par la formule suivante :

$$C_d = \left( \left( \frac{32}{Re} \right)^{2/3} + 1 \right)^{3/2}, \quad \text{valable pour les sédiments naturels avec } Re < 10^4 \quad (12)$$

Pour des  $Re > 10^5$  le coefficient de traînée est presque constant, Camenen and Larson (2007) proposent  $C_D = B \quad R_* > 10^5$

Avec  $B = 0.39$  pour des particules sphériques et  $1 < B < 1.3$  pour des sédiments naturels.

Dans ce cas la vitesse de chute s'écrit :

$$V_c = \sqrt{\frac{4}{3B} (s-1)gd} \quad (13)$$

Pour étudier le mélange eau sédiments on définit également les paramètres suivants :

La concentration volumique :

$$C_v = \frac{\text{volume des sédiments}}{\text{volume du mélange (eau + sédiments)}} = 1 - p_0 \quad (14)$$

La concentration massique :

$$C_m = \frac{\text{masse des sédiments}}{\text{masse du mélange (eau + sédiments)}} = \frac{C_v}{1 + (s-1)C_v} \quad (15)$$

Et quand l'eau est en écoulement, ces concentrations seront:

Concentration volumique transportée

$$C_{vt} = \frac{Q_s}{Q_s + Q_e} \quad (16)$$

Concentration massique transportée

$$C_{mt} = \frac{\rho_s Q_s}{\rho_s Q_s + \rho_e Q_e} \quad (17)$$

## II. SEIL DE MISE EN MOUVEMENT DE SEDIMENT

### II. 1 Introduction

La condition de mise en mouvement d'une particule solide posée sur le fond est évaluée sur la base des considérations d'équilibre entre les forces qui lui sont appliquées, mais à ce seuil correspondent trop souvent des valeurs très dispersées des paramètres qui le définissent. En augmentant la vitesse de l'eau sur un lit de granulat, tant que rien ne bouge, on ne peut rien dire, mais dès que la vitesse dépasse une certaine valeur critique ( $U_{cr}$ ), on voit que les grains composant le fond commencent à se déplacer en donnant naissance à un débit solide. Le transport solide par conséquent, est un phénomène à seuil.

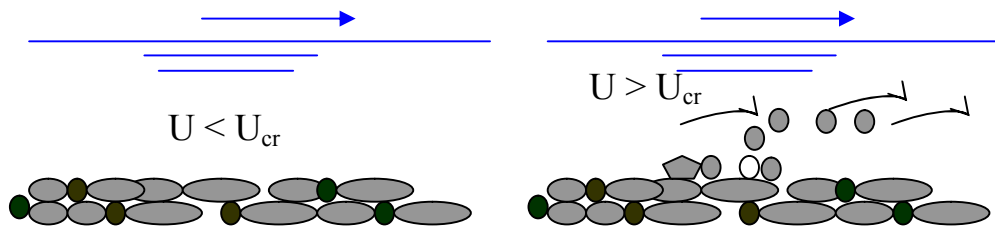


Fig. I-1 Début de mouvement des particules solides du fond

Les premières recherches à formuler le début de mouvement des sédiments par la vitesse d'écoulement près du fond. Dans cette catégorie de formules, nous citons comme exemple les travaux de Mavis (1948), Barekryan (1963) et Carstens (1966). La difficulté de mesurer (avec précision) la vitesse d'écoulement près du fond dans les cours d'eau naturels limite l'utilisation à grande échelle de ce type de formules. Toute fois, dans d'autres travaux ce seuil a été caractérisé par une vitesse moyenne d'écoulement critique. Dans cette catégorie de formules, nous citons comme exemple les formules suivantes :

$$\text{Jarocki 1963} \quad U_{cr} = 1.4\sqrt{gd_s} \ln\left(\frac{h}{7d_s}\right) \quad \text{valable pour } h/d_s > 60 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{Formule de J.E.Costa 1983} \quad U_{cr} &= 0.20d_s^{0.455} \quad [\text{m/s}] \quad \text{pour } d_s > 50 \text{ mm} \quad (19) \\ U_{cr} &= 0.27d_s^{0.4} \quad [\text{m/s}] \quad \text{pour } d_s > 500 \text{ mm} \end{aligned}$$

Parallèlement à ça, le critère de mise en mouvement des particules solides peut de même se définir par une tension critique de cisaillement au fond. Dans cette catégorie on cite la

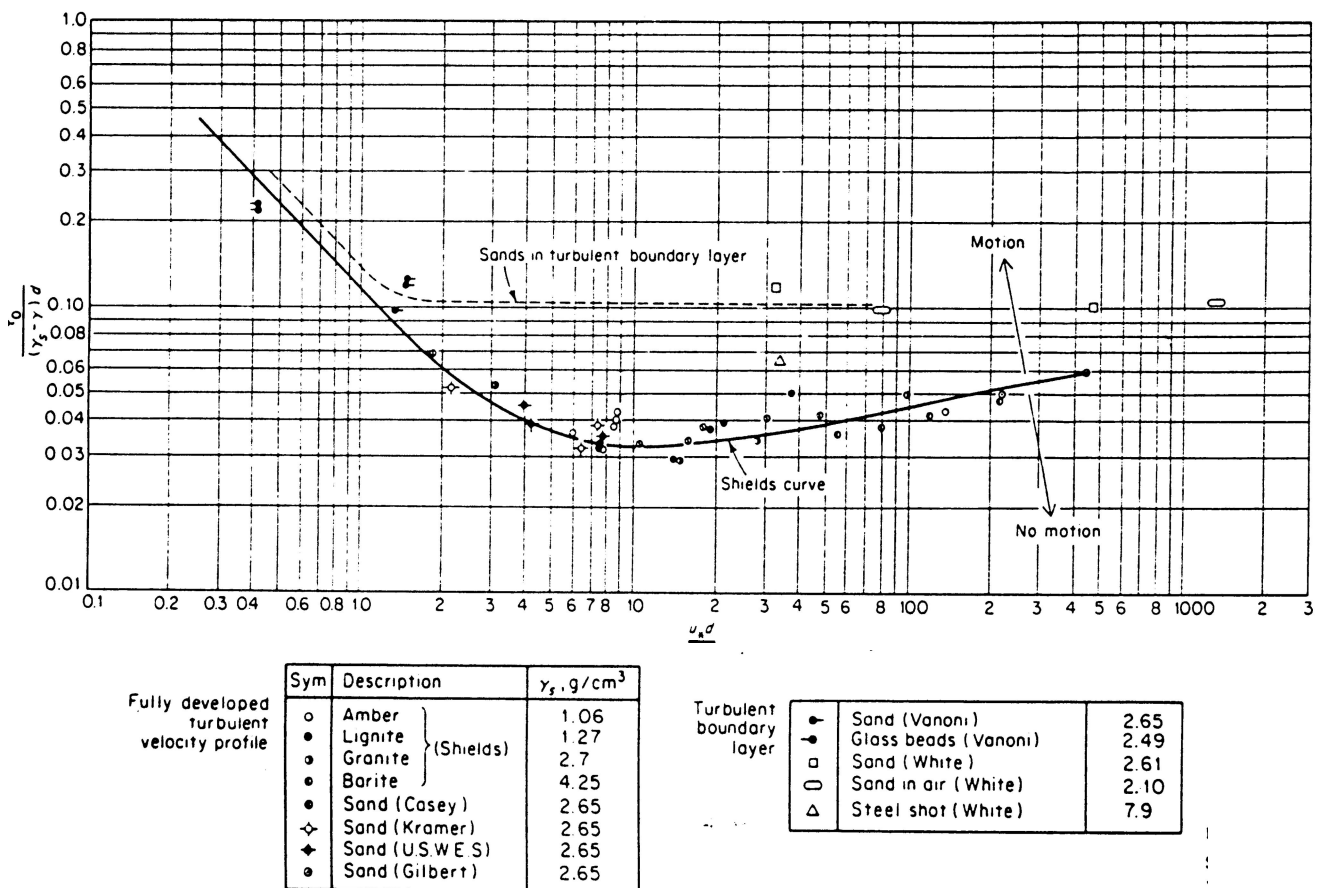
formule de Carling 1983  $(\tau_0)_{cr} = 11d_s^{0.38}$  proposée pour Grains caillouteux (20)

Shields (1936) a montré que la loi de mise en mouvement peut s'exprimer par un diagramme écrit en  $\tau_* = f(Re^*)$ , ce dernier est représenté dans la figure I.3, tel que :

$$\tau_* = \frac{(\tau_0)_{cr}}{(\gamma - \gamma_s)d_s} \quad \text{: la tension adimensionnelle de frottement}$$

$$Re^* = \frac{U_* d_s}{\nu} \quad \text{: le nombre de Reynolds de frottement}$$

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad \text{la vitesse de frottement}$$



Ce diagramme a été établi expérimentalement à partir de plusieurs expériences en canal rectangulaire à fond plat composé de sédiments dont  $d_{50}$  varie entre 0.36 et 3.44 mm.

Pour rendre l'utilisation du diagramme de Shields plus facile, Yalin (1972) propose d'éliminer la vitesse de frottement  $U_*$  de l'axe des abscisses en introduisant le diamètre adimensionnel des particules  $d^*$  qui se définit comme :

$$d_*^3 = \frac{Re_*^2}{\tau_*} = \frac{d_s^3 g}{\nu} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (21)$$

Où

$$d_* = d_s \left( \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (22)$$

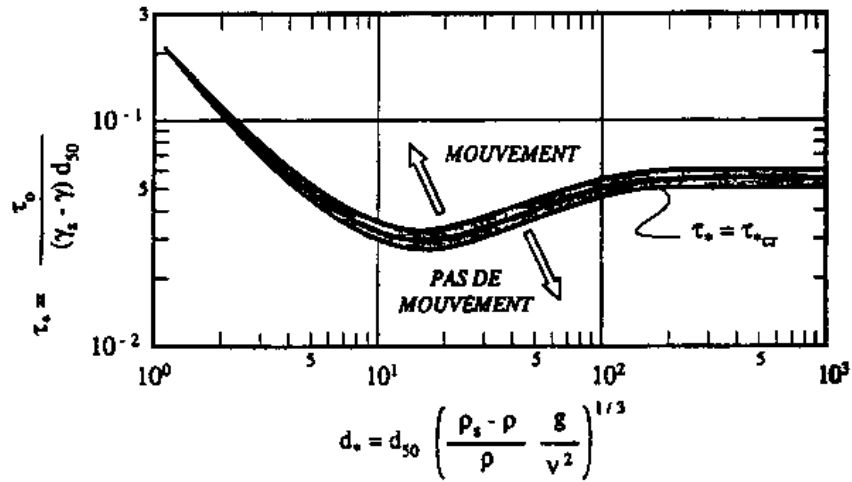


Diagramme de Shields modifié d'après Yalin (1972)



## Exercices

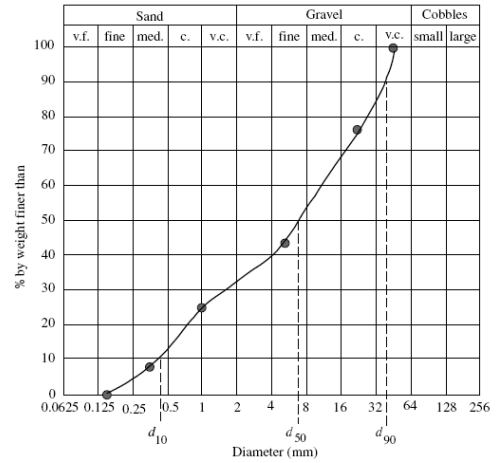
### Exercice N°1

De la figure ci-contre, déterminer :  
Le coefficient d'uniformité de ce mélange sédimentaire.

Expliquer son utilité.

### Exercice N°2

Soit une particule solide de taille 32x16x8 mm, déterminer son volume et son coefficient de forme



### Exercice N° 3

Pour une pente d'un cours d'eau  $I = 0.001$ , à Quelle profondeur d'eau les gros graviers ( $d_s = 4\text{cm}$ ) commencent à se déplacer

### Exercice N° 4

Un canal trapézoïdal a : une largeur  $b = 30$  m, une pente de la surface libre  $J = 3.5 \cdot 10^{-4}$ , une pente des talus ( $m = 2$ ), des sédiments du fond caractérisés par  $d_{50} = 4$  cm.

Si le débit est de la crue est  $Q = 160 \text{ m}^3/\text{s}$ , y-a-t-il un transport solide ?

A quel seuil de débit le fond reste stable ?

### III. MODE DE TRANSPORT SOLIDE

#### III.1 Débit solide (capacité de transport)

Les sédiments qui quittent le fond se déplacent sous plusieurs formes, soit par charriage, soit en suspension, plusieurs investigations ont été menées pour estimer les débits solides correspondants.

#### III.2 Débit solide par charriage :

Dans ce type de transport solide, les sédiments grossiers du lit se déplacent par roulement dans une petite couche près du fond. Il est difficile de citer tous les travaux et les formules proposées pour estimer le débit solide par charriage, on se limite à la formule largement citée dans la littérature :

##### *Formule de Meyer-Peter-Mueller (1948)*

Cette formule a été établie en utilisant des mesures en canaux du laboratoire pour des granulométries uniformes

$$\frac{q_{sc}}{\rho g \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} g d^3} = 8 \left( \frac{\rho g R_h J}{(\rho_s - \rho) g d} - 0.047 \right)^{3/2} \quad (23)$$

$q_{cs}$  est le débit solide unitaire en poids [N/ms]

Selon les travaux de Parker et Klingeman (1982), la formule de Meyer-Peter et Müller (1948) est valable pour des granulométries étendues avec un seuil de mise en mouvement égal à 0.138 au lieu de 0.047 de la formule (23).

#### III.3 Débit solide des sédiments en suspension

Ce mode de transport concerne les sédiments très fin qui sont misent en suspension à cause de leur poids faible par la turbulence de l'écoulement. Plusieurs lois empiriques sont proposées dans littérature scientifique pour estimer la concentration maximale en sédiments qu'un cours d'eau peut la transporter en suspension (capacité de transport). On se limite à la formule de Bagnold (1966) qui donne le débit solide en suspension comme suit :

##### *Formule de Bagnold (1966)*

$$q_{ss} = 0.01 \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \frac{\tau_0 U^2}{V_c} \quad (24)$$

$q_{ss}$  est le débit solide par suspension en [N/ms],  $V_c$  est la vitesse de chute des sédiments dans l'eau calme.

NB : En Algérie, on calcule souvent le débit solide en suspension comme le produit de la concentration moyenne des sédiments en suspension d'un écoulement au débit liquide correspondant

$$Q_{ss} = Q_l \times C_{ss} \quad (25)$$

$Q_{ss}$  : Débit solide en suspension

$Q_l$  : Débit liquide

$C_{ss}$  : Concentration moyenne de sédiments en suspension ;

#### III.4 Débit solide total (charriage et suspension)

Certains travaux ont proposé de formuler le débit solide total sans faire la distinction entre celui du charriage ou en suspension, plusieurs formules empiriques sont proposées pour le calcul de ce débit on cite :

##### *Formule d'Engelund et Hansen (1967)*

C'est une formule basée sur le concept de la puissance de l'écoulement. Elle a été validée sur des mesures de laboratoire sur un canal de 50 m de long et de 2.40 m de large et de  $d_{50}$  entre 0.19 et 93 mm et de terrain Elle s'écrit:

$$\frac{2gR_h J}{U^2} \frac{q_{st}}{\gamma_s \sqrt{(\gamma_s / \gamma - 1)gd^3}} = 0.1 \left[ \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d} \right]^{5/2} \quad (26)$$

Selon les deux auteurs cette formule est valide pour un fond avec formes dont les sédiments du fond  $0.15 < d < 5$  mm et une contrainte de frottement adimensionnelle  $\tau^*$  comprise entre 0.15 et 2.5 < . Cette formule doit être appliquée pour des cours d'eau à fond avec dunes (Wu, 2008 p. 100).