

Ch III -2

# **Ouvrages de protection contre l'érosion dans les cours d'eau**

H. Bouchelkia

## I. L'érosion

L'érosion est définie comme étant le détachement de fragments ou de particules de sol ou de roche de leur position initiales par l'eau et les autres agents géologiques, tels que, le vent, la glace, etc. Bien que les activités humaines influent particulièrement sur l'érosion des berges ou du fond du lit et quelque fois sur l'érosion des sols, l'homme a subi et ressentis l'effet de toutes les formes d'érosion et de dépôts de sédiments.

### I. 1, Types d'érosions:

1. L'érosion géologique est celle qui sculpte la surface de la terre, créant des montagnes, des vallées et les plaines d'inondation, dans des conditions naturelles ou relativement perturbées.
2. L'érosion des sols est étroitement liée aux terres agricoles, car par définition, le sol est constitué des matériaux minéraux ou organiques, non consolidés qui sont propre au développement de cultures. A la surface des terres agricoles, forestières ou à pâturages, les particules de sols sont détachées par le ruissellement.
3. L'érosion du réseau de drainage, c'est l'érosion des berges et du fond de chenaux par l'eau. Un fleuve ou cours d'eau transport les sédiments provenant du ruissellement de surface des parties amonts par l'érosion géologique ou l'érosion des sols.

# PROCESSUS ET EFFETS DE L'ÉROSION

## Le processus

L'érosion est un processus selon lequel les particules de sol sont arrachées de leur milieu, transportées par un agent de transport (l'eau, l'air) et déposées en un autre milieu. Ce processus peut s'écrire:

**ÉROSION = ARRACHEMENT → TRANSPORT → SÉDIMENTATION**

L'érosion se produit lorsque les forces d'arrachement en présence sur les particules de sol sont plus grandes que leurs forces de résistance. Le phénomène est d'autant plus important que le déséquilibre est grand. La déposition survient lorsque les forces de transport sont plus faibles que le poids des particules.

## Les effets

Les effets de l'érosion se font sentir sur le milieu d'origine comme sur celui où se déposent les particules de sol. Ces effets sont d'ordres physique et chimique. Au niveau du milieu d'origine, le plus grand effet de l'érosion est la perte de sol. Ces pertes sont d'autant plus néfastes qu'elles sont plus grandes que le taux de formation de la couche arable. Ce sol perd graduellement son potentiel de production et la culture devient impossible après un laps de temps plus ou moins long.

Ce sol enlevé devient à un moment ou l'autre des sédiments qui envasent les cours d'eau et les réservoirs.

Au niveau chimique, la perte d'éléments nutritifs (azote, potassium et phosphore) représente une valeur économique importante. Les nitrates sont facilement emportés car ils sont très solubles.

Quant aux phosphates, ils sont surtout liés aux sédiments. Ces éléments nutritifs sont une cause principale de pollution en diminuant la qualité de l'eau. La présence de phosphates stimule la croissance des algues..

## MÉCANISMES PROVOQUANT L'ÉROSION hydrique

Les mécanismes provoquant l'érosion sont liés à l'énergie de la pluie ou à l'énergie de l'écoulement de l'eau.

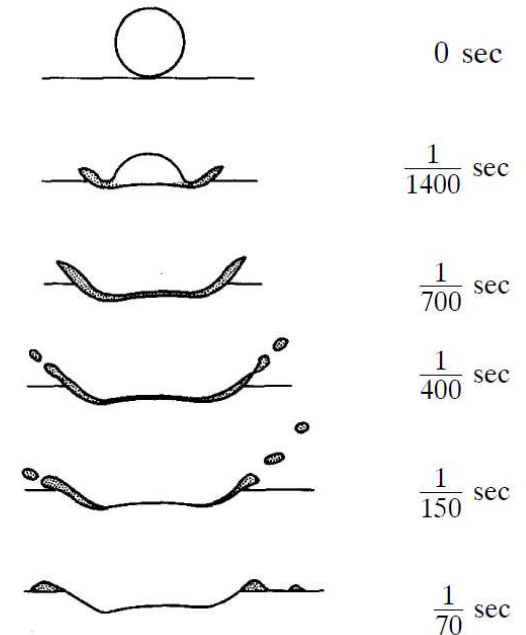
### L'impact des gouttes de pluie

La goutte de pluie qui arrive au sol entre en collision avec les agrégats du sol (figure ) et forme un cratère. L'énergie de cette goutte de pluie est absorbée par la projection de ces agrégats, par la déformation ou le bris de ceux-ci (cas le plus fréquent), ou par les deux en même temps. Les projections des particules de sol sont les éclaboussures, phénomène facilement visible après une pluie au bas des murs ou sur la partie inférieure des tiges et des feuilles des plantes.

La force d'impact d'une goutte d'eau est égale à sa décélération multipliée par sa masse. Son énergie est proportionnelle à sa masse et à sa vitesse au carré. En chute libre, la vitesse de cette goutte d'eau est d'autant plus grande qu'elle est grosse. Les gouttes de pluie possèdent une distribution de grosseur qui dépend de l'intensité de la pluie ( $I$ ). L'énergie d'une pluie ( $E$ ) a été évaluée par Wischmeier et Smith (1958) :

$$E = 0,1190 + 0,0379 \ln i$$

$E$  = énergie cinétique ( MJ /ha mm)  
 $i$  = intensité de la pluie (mm/h)



Les particules de sol pulvérisées entrent facilement en suspension dans la lame d'eau à la surface du sol et elles ont deux choix :

- ✓ si l'eau s'infiltré, elles seront déposées et formeront une croûte (phénomène de battance) qui deviendra peu perméable lors de la prochaine précipitation.
- ✓ si l'eau ruisselle, elles seront, pour un grand nombre, emportées par l'eau et le processus dynamique d'érosion est amorcé.

### La force d'arrachement de l'écoulement

L'eau qui coule sur une surface exerce une force de traction qui essaie d'arracher les particules de sol se trouvant sur son chemin. Cette force est proportionnelle au gradient de vitesse de l'écoulement au contact de la surface:

$$T = \mu \frac{\partial v}{\partial x} \quad \text{avec } T = \text{force de traction, } \frac{\partial v}{\partial x} = \text{gradient de vitesse, } \mu = \text{viscosité}$$

L'augmentation de la quantité de sédiments accroît la viscosité de l'eau et nécessairement cette force de traction. En un sens, l'érosion est génératrice d'érosion. Le gradient de vitesse pour un écoulement uniforme est généralement proportionnel à la vitesse d'écoulement. Cette vitesse d'écoulement est influencée par la pente du sol, l'épaisseur de la lame d'eau et la rugosité de la surface. L'équation de Manning montre bien l'importance de chacun des termes.

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad V = \text{vitesse d'écoulement (m/s), } n = \text{coefficient de rugosité, } R_h = \text{rayon hydraulique de la lame d'eau ou du canal en fonction de la profondeur d'écoulement "y", } I = \text{pente hydraulique (m/m)}$$

## TYPES D'ÉROSION

### **1. L'érosion par l'impact des gouttes de pluie**

Le processus de l'impact des gouttes de pluie a été décrit dans la section 8.3.1. En général, c'est l'une des formes d'érosion les plus importantes en termes de dégradation du sol. Selon Schwab et al. (1966), le sol éclaboussé est de 50 à 90 fois plus important que le sol emporté par l'écoulement. L'impact des gouttes de pluie peut projeter une particule de sol à plus de 1.5 m de son point d'origine.

### **2 L'érosion en nappe (sheet erosion)**

L'eau qui ruisselle en une mince lame à la surface du sol arrache les particules de sol comme une mince couche uniforme (une nappe) et les entraîne. C'est un concept plutôt idéalisé car l'eau se concentre rapidement dans les micros dépressions pour provoquer l'érosion en rigoles.

### **3 L'érosion en rigoles**

Les micros dépressions du terrain causées par les raies de labour et les sillons plus ou moins creusés par le semoir ou le planteur provoquent rapidement la concentration de l'eau qui ruisselle. Cette concentration de l'écoulement augmente le débit, la vitesse d'écoulement et les forces d'arrachement. Avec l'arrachement du sol, ces micros dépressions s'accroissent pour former des rigoles. L'érosion en rigoles est considérée tant que les rigoles creusées peuvent être réparées par les opérations normales de travail du sol.

#### **4. Le ravinement**

Par la suite, l'eau des rigoles se concentre avec leurs sédiments dans de plus grandes dépressions topographiques ou les talwegs du terrain. Avec les grandes vitesses d'écoulement, les masses d'eau importantes et la faible résistance du sol, le sol peut être profondément entaillé. Le processus survient généralement comme ceci:

*a. Une modification dans l'environnement (changement des cultures, modifications des aménagements) et des pluies importantes occasionnent des débits et des vitesses plus grands que normalement. Alors, la végétation et le sol de l'horizon de surface sont graduellement arrachés. Le phénomène de ravinement vient de s'amorcer;*

*b. les horizons inférieurs étant en général de résistance plus faible que celui de surface, le phénomène s'accélère à un rythme considérable. En général, le processus s'amorce en un point où la pente change pour s'accroître;*

*c. après un certain temps, le ravin atteint un nouvel équilibre, se stabilise et la végétation s'y installe pour le consolider. Mais les dégâts sont faits.*

#### **5. L'érosion dans les cours d'eau**

Dans les cours d'eau, l'érosion est de deux types. Le premier est causé par les grandes vitesses d'écoulement qui arrachent le matériel de faible résistance sur le lit du cours d'eau. Le deuxième est dû à l'instabilité mécanique des talus qui s'effondrent dans le lit et dont le matériel est emporté.



*Érosion en rigoles: ravinement en plein champ.*



*Ravinement dans le Nord-Boulonnais sur des parcelles laissées nues l'hiver.*



*Dans le sud du Boulonnais, cette ravine atteint plus de 1,50 m de profondeur*





*Dégâts sur des parcelles semées dans le sens de la pente*

## FACTEURS INFLUENÇANT L'ÉROSION HYDRIQUE

### 1/ La nature du sol

Le facteur sol le plus important est la résistance (stabilité) des agrégats à l'impact des gouttes de pluie. Cette résistance ou cette stabilité est influencée positivement par la présence d'agents liants tels que les argiles, la matière organique et le calcium. Ainsi, les sols de texture limoneuse sont généralement plus sensibles que les sols argileux à cause de leur faible stabilité structurale. Au niveau de la stabilité des agrégats, la matière organique est un des facteurs les plus importants. La grosseur des agrégats ou des particules de sol joue un rôle primordial. Plus ils sont gros, plus ils sont difficiles à briser et plus ils sont difficiles à transporter.

La porosité du sol influence indirectement le potentiel d'érosion des sols. Une plus grande porosité favorise une plus grande infiltration et un volume de ruissellement moindre, ce qui diminue les possibilités d'érosion. Lorsque le sol possède une plus grande capacité de stockage de la pluie, cela diminue le volume de ruissellement et l'érosion. Cette capacité est favorisée par une plus grande épaisseur de la couche arable, une teneur en eau faible avant la précipitation et la capacité intrinsèque de stockage du sol.

## **2/ Le couvert végétal**

Sur un sol nu, ce sont les particules de sol qui absorbent directement l'énergie des gouttes de pluie. Par contre, un couvert végétal peut absorber une partie importante de l'énergie de la pluie.

Face à l'écoulement, la présence de végétation augmente considérablement le facteur de friction de Manning. Tant que la végétation n'est pas submergée, le facteur de friction peut facilement être augmenté de dix (10) fois par rapport au sol nu. Sous un autre aspect, le système racinaire enlace considérablement les agrégats et accroît considérablement leur résistance à l'arrachement. De plus, les racines sont un excellent apport de matière organique pour le sol, ce qui augmente la porosité du sol, augmente l'infiltration et diminue le ruissellement.

La végétation possède un taux d'évapotranspiration supérieur à celui d'un sol nu, ce qui contribue à diminuer les réserves en eau du sol et augmente sa capacité de stockage pour la pluie suivante. Le ruissellement potentiel et l'érosion seront alors moindres.

Face à l'érosion, la végétation joue plusieurs rôles : elle absorbe l'énergie de la pluie, protège le sol et influence positivement les propriétés physiques du sol.

### **3/ Les facteurs climatiques**

En général, un plus grand volume de précipitation provoque un plus grand volume de ruissellement et nécessairement une plus grande érosion.

En climat sec ou chaud, où l'évapotranspiration est plus grande que les précipitations, le sol possède un plus grand déficit, ce qui augmente sa capacité d'absorber une précipitation et diminue le ruissellement et l'érosion. Pour deux précipitations identiques, les conditions météorologiques antérieures jouent un rôle important sur leur potentiel respectif d'érosion.

Une longue période sans pluie augmente les capacités de stockage du sol et d'absorption de la précipitation et diminue le ruissellement et l'érosion. Tous les facteurs qui influencent positivement l'évapotranspiration contribuent à diminuer le potentiel d'érosion. Une mauvaise répartition des précipitations provoquent une concentration de celles-ci qui augmentent le volume de ruissellement et le potentiel d'érosion.

### **4/ Les facteurs topographiques**

La pente du terrain est le facteur topographique le plus important. L'influence première de la pente est l'augmentation des vitesses d'écoulement comme le montre l'équation de Manning. Sur des pentes plus grandes, l'infiltration est plus faible et le volume de ruissellement augmente. La longueur de la pente joue un rôle similaire. Elle augmente le volume de ruissellement et ainsi l'érosion. Les micros dépressions du terrain provoquent une concentration de l'écoulement qui augmente le potentiel érosif par rapport à un même volume de ruissellement coulant selon une lame uniforme. Par contre, les dépressions fermées limitent les effets de l'érosion en permettant aux sédiments en suspension de se déposer au lieu de poursuivre leur chemin

## II. TRANSPORT SOLIDE



## II. Le transport solide

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion. L'eau trouve la puissance nécessaire pour ce transport dans la perte de charge qu'elle subit, ensuite, elle met en jeu deux types de mécanismes : le charriage et la suspension, qui sont les deux types principaux du transport solide.

La répartition entre ces deux types de mécanismes dépend essentiellement de la dimension des matériaux, rapportés à la vitesse de l'eau et la turbulence de l'écoulement. En tout point d'une rivière, l'alimentation en débit solide est définie par les caractéristiques hydrologiques de son bassin versant.

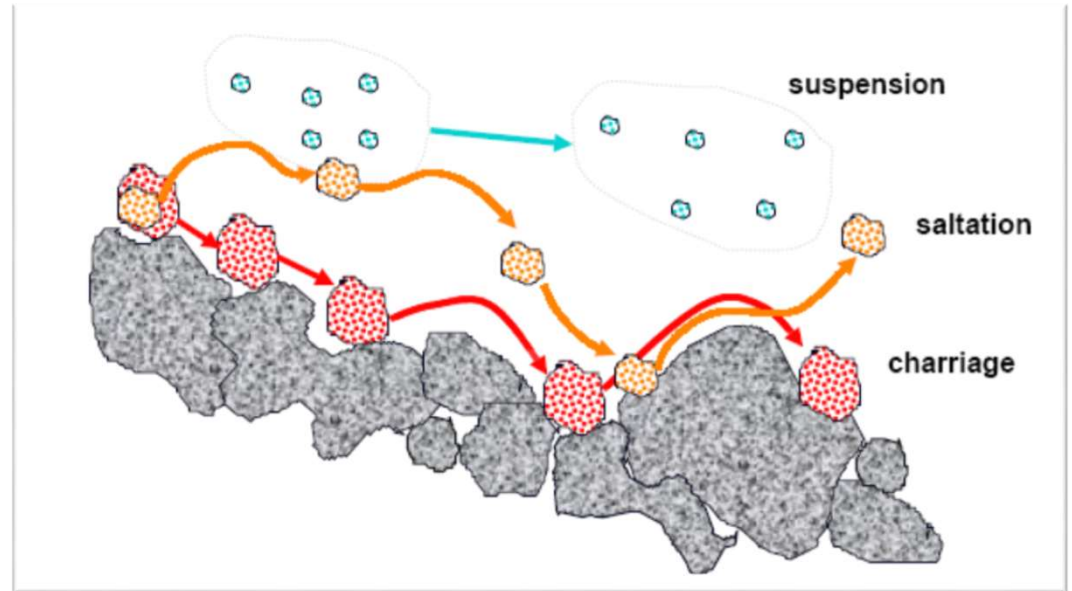


Figure I.2.1 : mode de transport des sédiments

## **LE TRANSPORT PAR CHARRIAGE (*BED LOAD*) :**

Le transport par charriage est l'un des principaux types de transport solide dans un cours d'eau, il concerne les plus gros éléments qui contribuent à formation et à l'équilibre du lit, principalement la pente.

Ces éléments sont transportés sur le fond par roulement, glissement et par saltation, la direction du mouvement est en gros parallèle au fond et les accélérations verticales sont faibles .

Il est difficile de donner une définition universelle acceptable de la charge de fond, mais EINSTEIN a dressé une liste de caractéristiques qui y sont généralement associées :

1. Il y a échange de particules, permanent et intense entre la charge de fond en mouvement et le lit.
2. La charge du fond se déplace lentement vers l'aval et le mouvement de chaque particule, individuellement, se fait à coups rapides séparés par des intervalles de repos relativement longs.
3. Le saut moyen d'une particule est à peu près indépendant des conditions d'écoulement, de l'intensité du transport solide et de la composition des sédiments.
4. Les vitesses de déplacement des différentes particules varient selon qu'elles se déplacent plus ou moins souvent.

## **TRANSPORT PAR SUSPENSION (*SUSPENDED LOAD*) :**

Le transport par suspension est le deuxième type de transport solide dans un cours d'eau. Il concerne les éléments fins, qui progressent dans le sens du courant au sein même du liquide.

Ces éléments fins du transport solide sont maintenus en suspensions par la turbulence et la quantité de ces matériaux dépend essentiellement des éléments fins; qui proviennent de l'érosion du bassin versant, suite au ruissellement des eaux de pluies .

Au fur et à mesure que la vitesse du courant s'accroît dans le cours d'eau, l'intensité de la turbulence et l'épaisseur de la couche limite turbulente s'accroissent également. On arrive finalement à un stade où les particules en saltation atteignent une hauteur au-dessus du fond où les forces ascensionnelles fluctuantes dues à la turbulence dépassent le poids des particules.

A partir de ce moment, les particules ne suivent plus une trajectoire définie ; mais elles suivent des trajectoires aléatoires dans l'épaisseur du fluide.



## EXPÉRIENCE POUR ILLUSTRER CHARRIAGE ET SUSPENSION

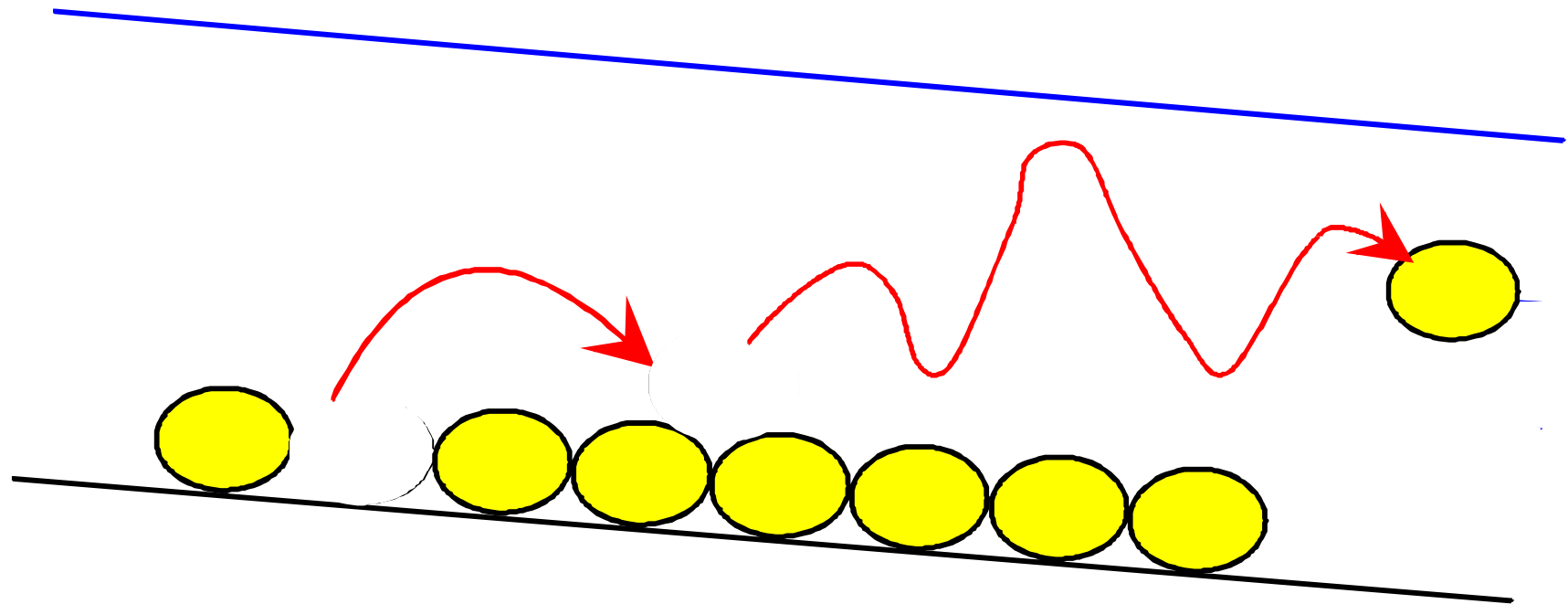
Dans un canal vitré uniforme, plaçons sur le fond une épaisseur de grains de graviers identiques et faisons ensuite croître la vitesse de l'écoulement. Pour les faibles vitesses, rien ne se passe : les matériaux solides restent au repos.

Pour les vitesses plus élevées, les matériaux solides se déplacent sur le fond en roulant, en glissant ou en effectuant des bonds successifs : le phénomène est appelé charriage. Les grains se déplacent à une vitesse nettement inférieure à celle de l'eau.

Pour des vitesses encore plus élevées, les matériaux prélevés sur le fond sont emportés par le courant : le phénomène est appelé transport en suspension. Les grains se déplacent à la vitesse de l'eau au droit du grain.

# Cas d'un matériau de fond uniforme

*Faisons croître la vitesse ...*

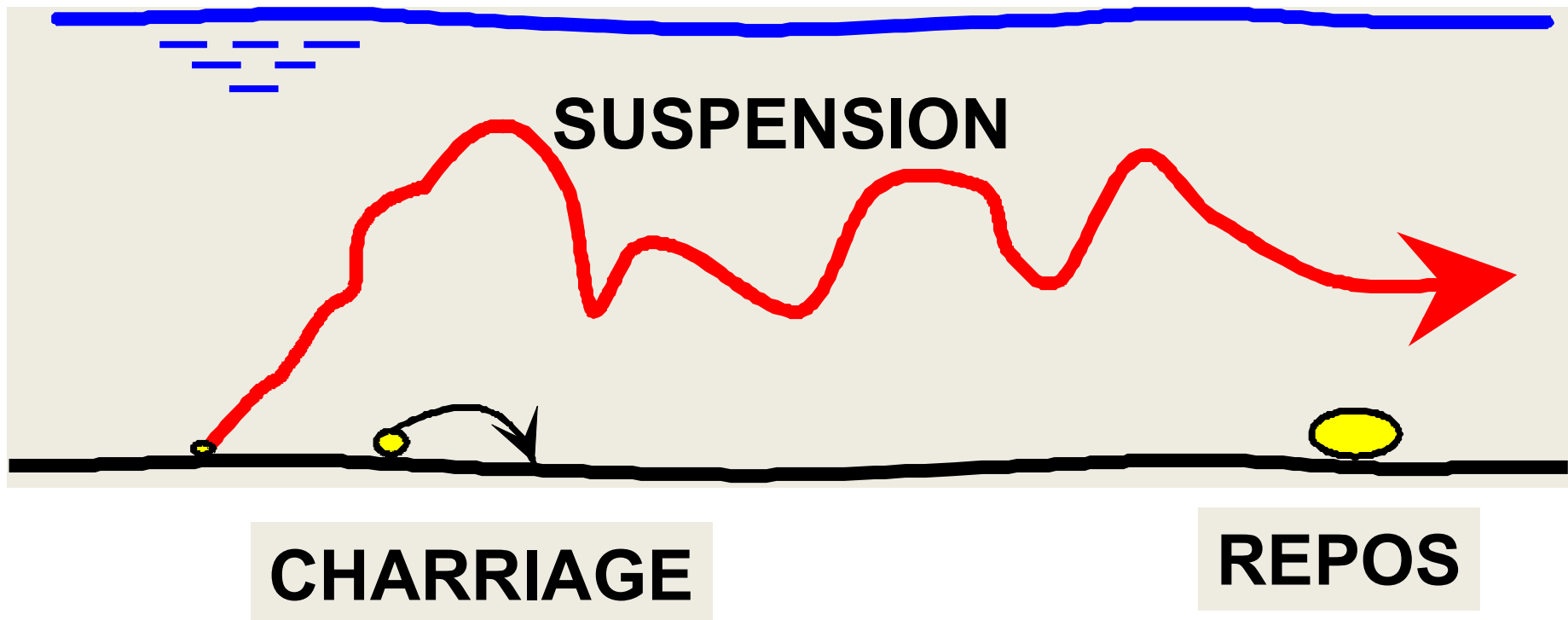


**repos**

**charriage**

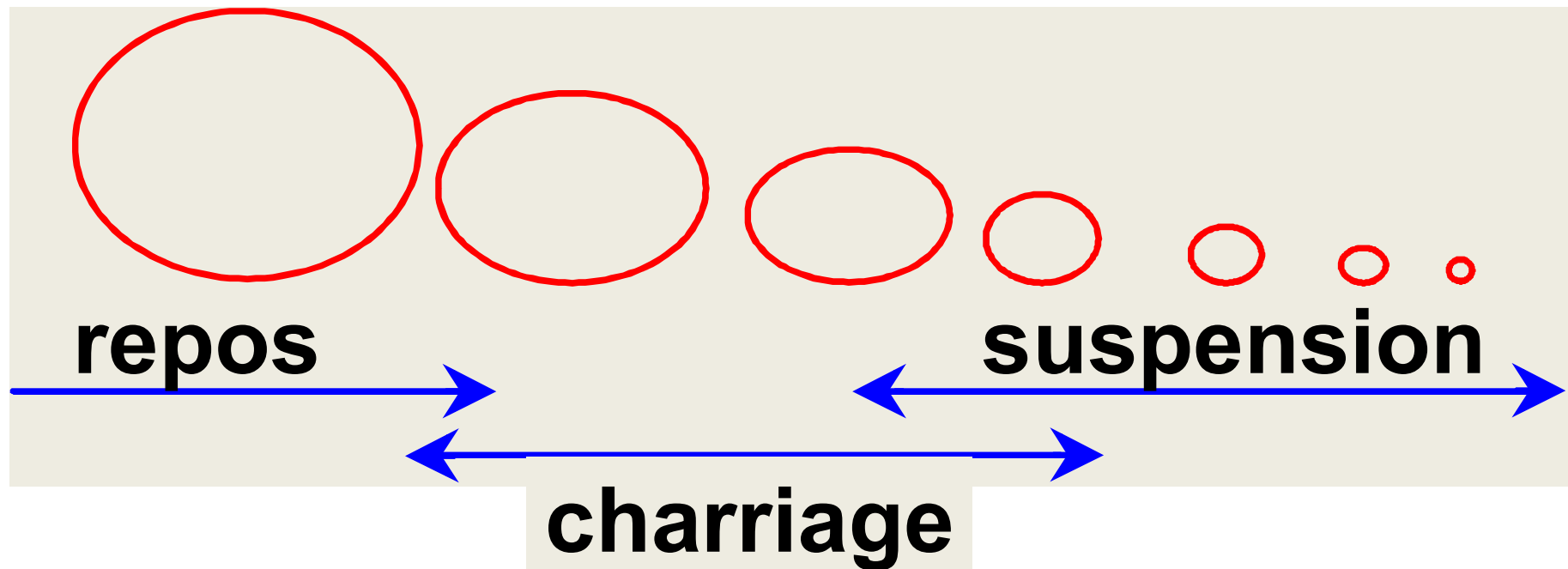
**suspension**

# Cas de matériaux de fond non uniformes



# Rôle de la taille des grains

*Pour un débit donné, il peut y avoir simultanément :*

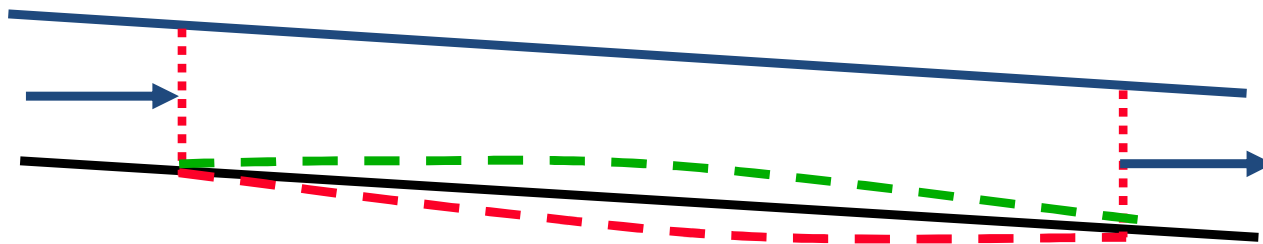


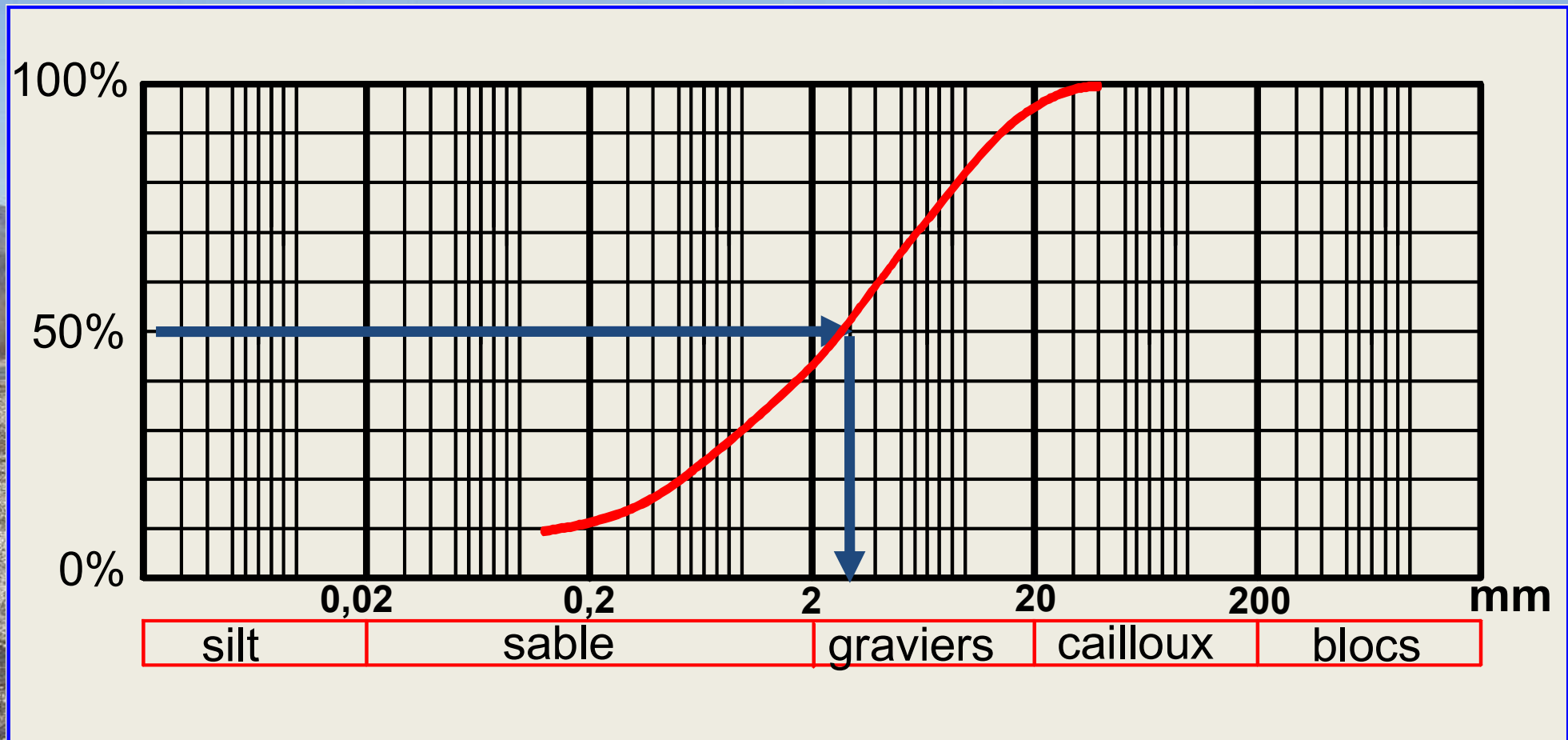
# Saturation en débit solide

$Q_s$  sortant =  $Q_s$  entrant : équilibre

$Q_s$  sortant <  $Q_s$  entrant : **dépôt**

$Q_s$  sortant >  $Q_s$  entrant : **érosion**





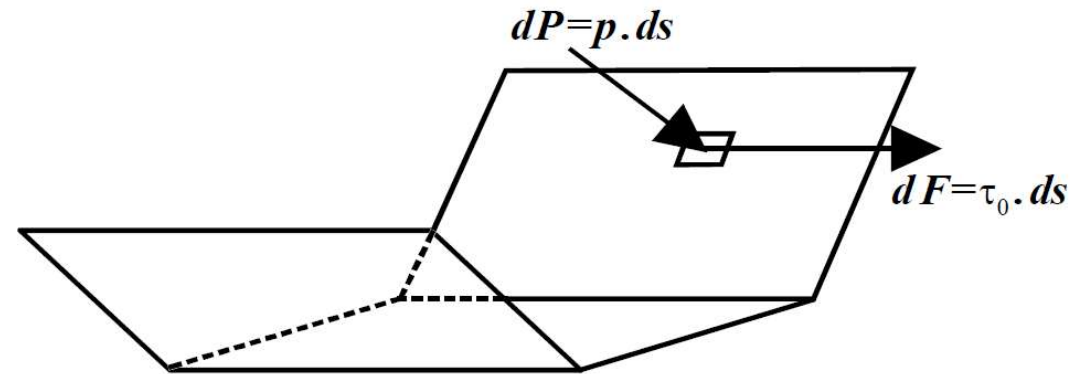
$$d_{50} = 3 \text{ mm}$$

*Élément fondamental  
de l'identité de la rivière*

## FORCE TRACTRICE ET DÉBUT DE MISE EN MOUVEMENT D'UNE PARTICULE

Les sédiments d'un cours d'eau sont susceptibles d'être mis en mouvement sous l'action des forces hydrodynamiques appliquées par l'écoulement et compte tenu de leur propre poids.

Considérons un écoulement permanent uniforme de tirant d'eau  $y$ . L'eau exerce aussi sur les parois du chenal une force de frottement notée :  $dF = \tau_0 \cdot ds$ .



$\tau_0$  est la force de frottement par unité de surface ou contrainte tangentielle à la paroi (voir figure). L'expression consacrée est celle de force tractrice. C'est un abus de langage puisque l'on devrait parler de tension ou de force tractrice unitaire

Dans l'écoulement uniforme, la masse fluide comprise entre deux sections rapprochées est en équilibre sous l'action de son poids et des frottements sur les parois, on démontre que :  $\tau_0 = \gamma_w \cdot R \cdot i$ , ce qui peut être confondu avec :  $\tau_0 \approx \gamma_w \cdot y \cdot i$  lorsque le lit est large car  $R \approx y$ .

Pour étudier la possibilité de mise en mouvement d'un grain sans cohésion de diamètre  $d$  dont le poids volumique est  $\gamma_s$ , considérons les différentes forces auxquelles il est soumis (figure).  $\gamma_s$  est le poids volumique spécifique des grains, c'est à dire de la roche constitutive. *Il est presque toujours de l'ordre de 26 ou 27 kN/m<sup>3</sup>.*

- Si la particule est sphérique, de diamètre  $d$ , son poids est  $P = \gamma_s \left( \frac{\pi d^3}{6} \right)$ . Pour une particule de forme quelconque, le poids s'écrit aussi sous la forme  $P = a \gamma_s d^3$

Le poids immergé est la résultante du poids :  $P = \gamma_s \pi d^3 / 6$

et de la poussée d'Archimède  $P' = a \gamma_w d^3$ ,  $d$  étant le diamètre caractéristique .

Le poids est vertical, mais la poussée d'Archimède est normale à l'écoulement.

- Le poids immergé peut donc se décomposer en une composante normale:

$$(P_n - P') = a (\gamma_s - \gamma_w) d^3 \cdot \cos \alpha.$$

et une composante tangentielle  $P_t = a (\gamma_s - \gamma_w) \cdot \sin \alpha$ ,  $\alpha$  étant l'angle du fond avec l'horizontale ( $i \approx \sin \alpha$  et  $\cos \alpha \approx 1$ ).

- La force de frottement engendrée par la composante normale du poids, vaut :

$$F = a (\gamma_s - \gamma_w) d^3 \cos \alpha \cdot \tan \phi \approx a (\gamma_s - \gamma_w) d^3 \cdot \tan \phi$$

où  $\tan \phi$  est le coefficient de frottement grain sur grain mesuré sous l'eau (les grains sont supposés sans cohésion) ;

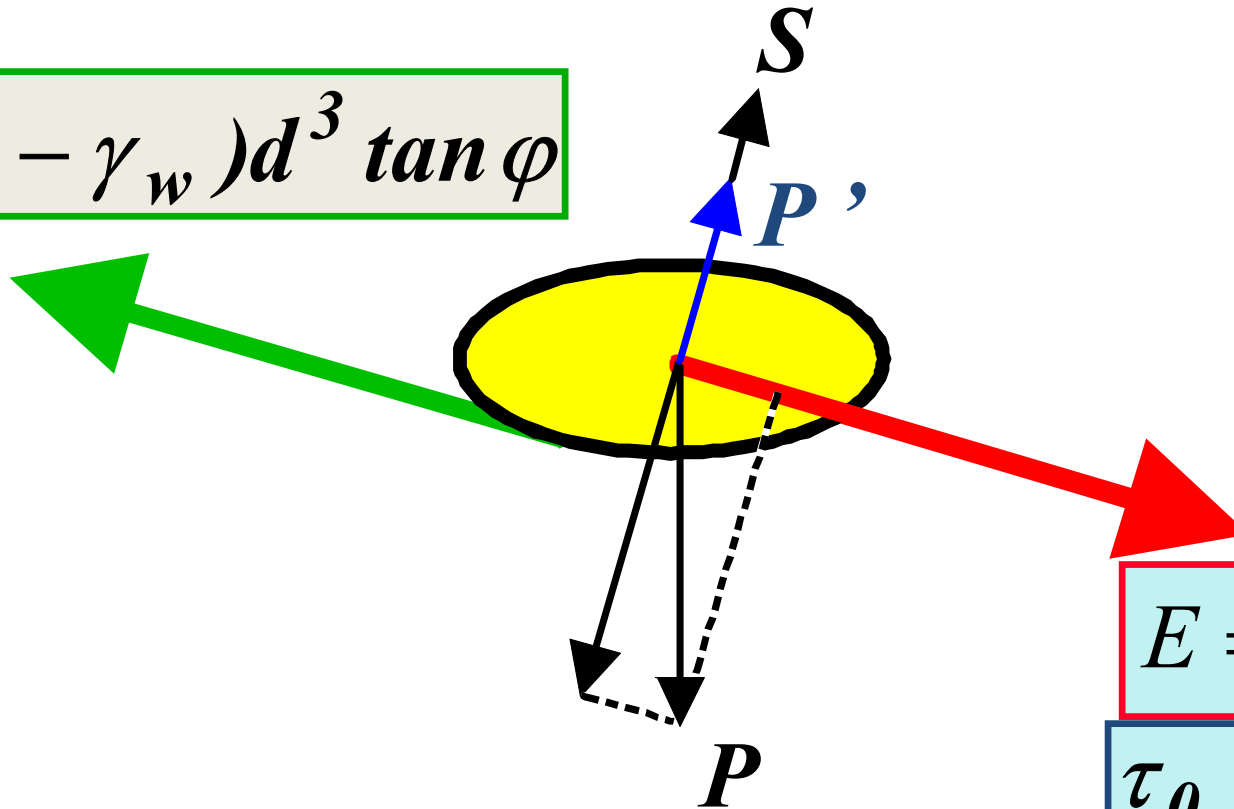
- La force d'entraînement due à l'écoulement (ou traînée) est proportionnelle à la section du grain :  $E = b \cdot \tau_0 \cdot d^2$ , et  $b$  étant un coefficient de forme, et  $\tau_0$  la force tractrice.

- La portance (ou sustentation) de la forme :  $S = c \cdot \gamma_w \cdot d^2 \cdot \frac{V^2}{2g}$ ,  $V$  étant la vitesse de l'eau au voisinage du fond et  $c$  un autre coefficient de forme.



# Équilibre d'un grain

$$F = a(\gamma_s - \gamma_w)d^3 \tan \varphi$$



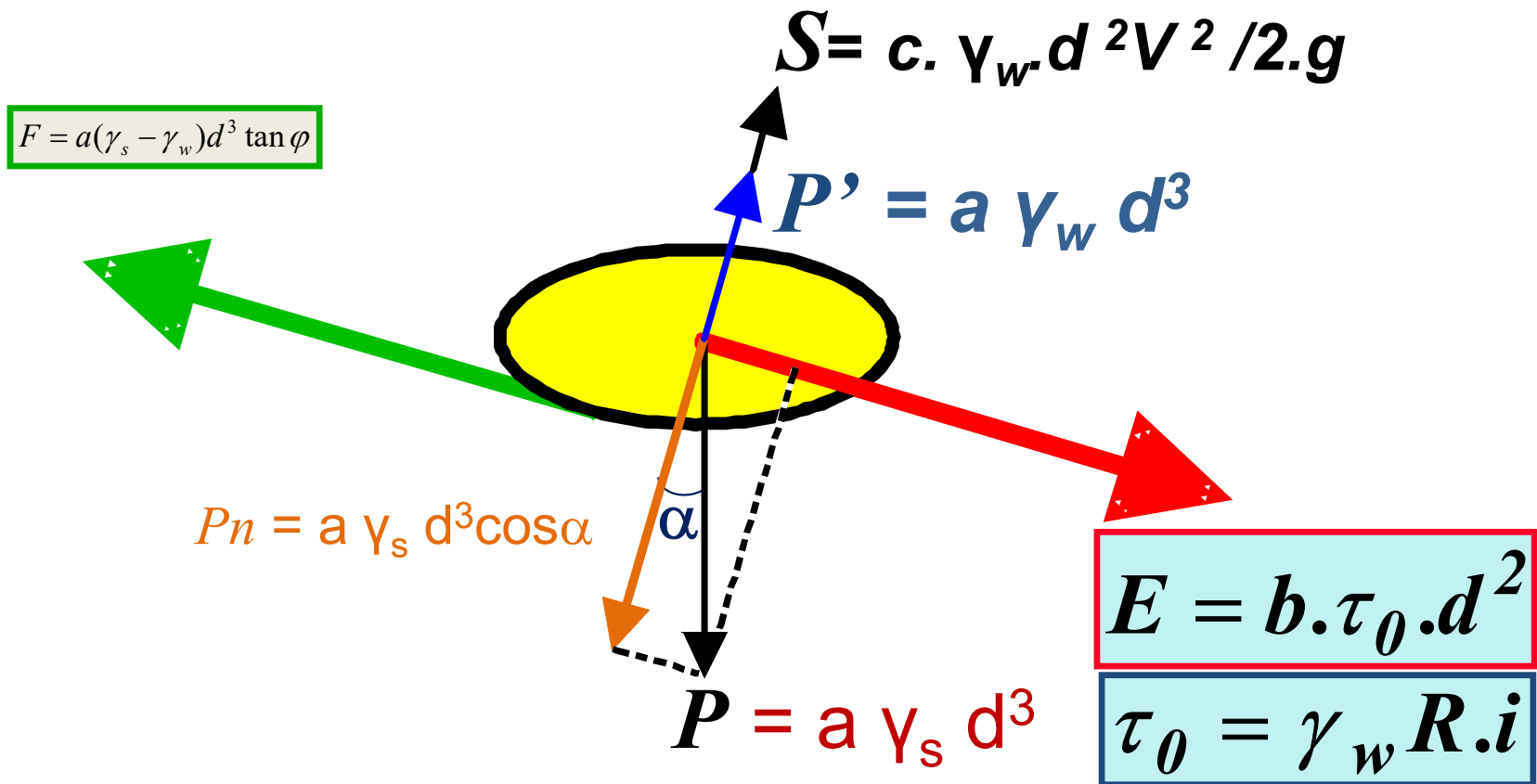
$$E = b.\tau_0.d^2$$

$$\tau_0 = \gamma_w R.i$$

$$\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_w)d} < a.\tan \varphi / b$$

$$\tau^* = \frac{y.i}{1,6.d}$$

# Équilibre d'un grain



$$\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_w)d} < a \cdot \tan \varphi / b$$

$$\tau^* = \frac{y \cdot i}{1,6 \cdot d}$$

Au seuil de mise en mouvement  $t \ E = F - P_t$ . La force tractrice limite vaut donc  $\tau_c$  tel que :

$$b \cdot \tau_c d^2 = a (\gamma_s - \gamma_w) d^3 (\cos\alpha \cdot \tan\phi - \sin\alpha)$$

si  $\alpha$  petit  $\cos\alpha \approx 1$  et  $\sin\alpha \approx 0$  d'ou  $\Rightarrow b \cdot \tau_c d^2 = a (\gamma_s - \gamma_w) d^3 \cdot \tan\phi$

$$\text{c'est-à-dire } \tau_c = a (\gamma_s - \gamma_w) \cdot \tan\phi \cdot d / b$$

La « force » tractrice critique, c'est-à-dire de début d'entraînement, peut donc se mettre sous la forme  $\tau_c = \tau^* \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d$

$$\text{avec } \tau^* = a \cdot \tan\phi / b \quad (\text{Si le grain est sphérique } \tau^* = \pi \cdot \frac{\tan\phi}{6b})$$

Le paramètre adimensionnel  $\tau^*$  est classiquement appelé paramètre de Shields.

Or  $\tau_c = \gamma_w \cdot R \cdot i$  Le paramètre de Shields défini ci-dessus s'écrit donc :

Où :  $R$  = rayon hydraulique ;

$i$  = pente de l'écoulement ;

$\gamma_s$  = poids volumique spécifique des grains solides  $\gamma_s \approx 26$  à  $27 \text{ kN/m}^3$  ;

$\gamma_w$  = poids volumique de l'eau ( $\gamma_w \approx 10 \text{ kN/m}^3$ ) ;

$d$  = diamètre du grain.

$$\tau^* = \frac{\gamma_w \cdot R \cdot i}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d}$$

Pour un canal très large  $R \approx y$ ,  
 $\gamma_s \approx 26 \text{ kN/m}^3$  et  $\gamma_w \approx 10 \text{ kN/m}^3$



$$\tau^* = \frac{y \cdot i}{1,6 \cdot d}$$

Shields a montré en 1936 que pour une granulométrie uniforme, la loi de mise en mouvement des grains pouvait s'exprimer par une simple relation entre  $\tau^*$  et le nombre de Reynolds du grain :  $R^* = \frac{u^* \cdot d}{\nu}$  où  $u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g \cdot R \cdot i}$  est la vitesse de frottement près du fond et  $\nu$  est la viscosité de l'eau. Cette expression faisant intervenir  $\tau_0$  en abscisse et en ordonnée n'est pas très pratique.

Nous préférons la présentation de Yalin (1972) qui a transformé la relation de Shields en une relation entre  $\tau^*$  et  $d^* = d \cdot \left( \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \cdot \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3}$ .

Cette relation apparaît en figure ci-après

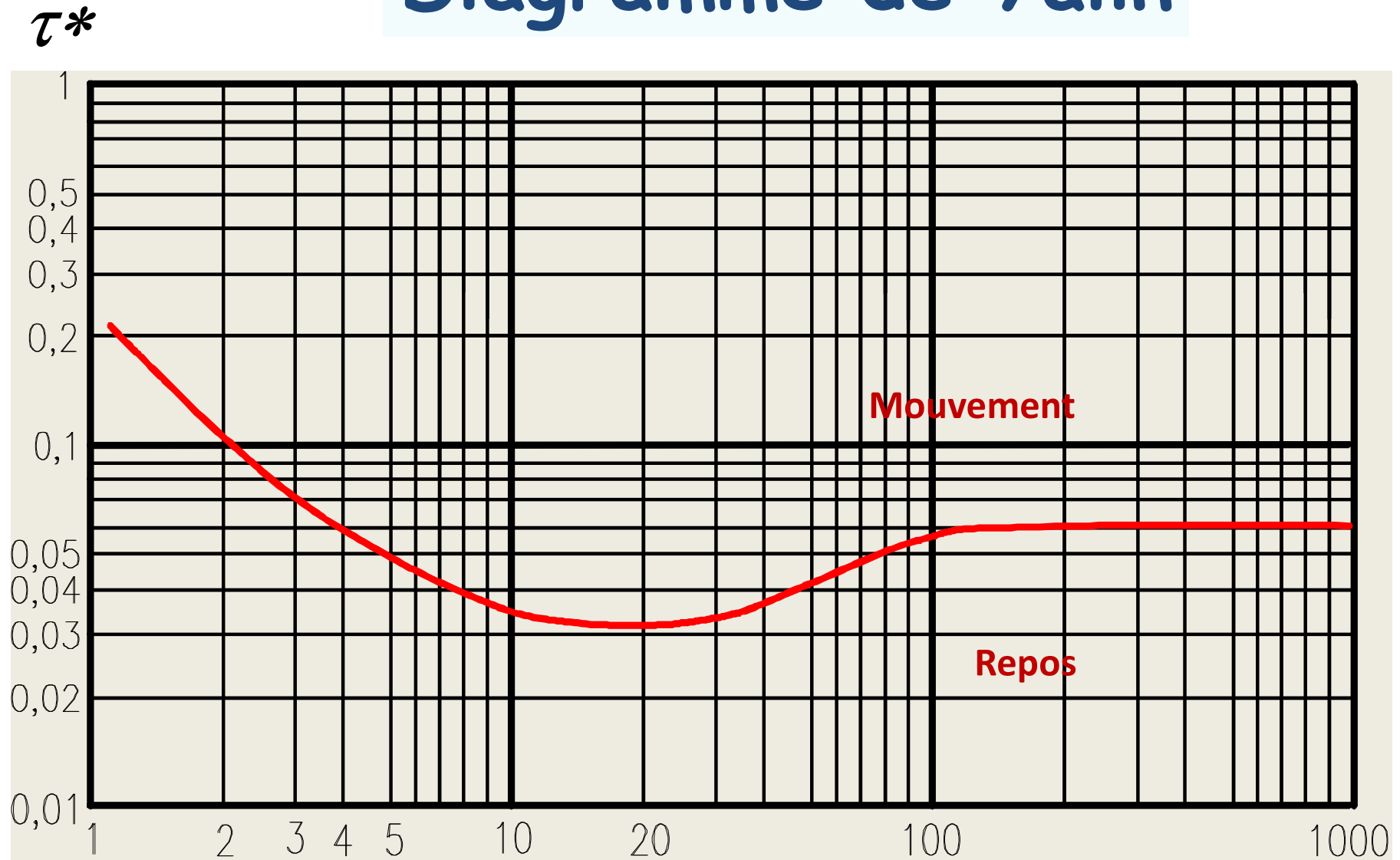
En supposant que  $\frac{\gamma_s}{\gamma_w} = 2,6$ , et en se plaçant à 20°C, la viscosité cinématique vaut

$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$ , et il vient  $d^* = 25000 \cdot d$ .

La figure montre donc qu'à 20°C, le matériau correspondant au plus faible paramètre de Shields a pour diamètre environ 0,8 mm (sable).

D'autre part le critère d'apparition des rides est  $d^* \leq 15$ , ce qui correspond à des diamètres de l'ordre de 0,6 mm (toujours à 20°C).

# Diagramme de Yalin



à  $20^\circ C$ ,  $d^* = 25000.d$

$d^*$

# Déplacement grain diamètre $d$

$$\tau^* = \frac{y \cdot i}{1,6 \cdot d}$$

$$\tau^* > 0,047$$

: charriage

$$\tau^* < 0,062$$

: charriage sur fond plat

$$\tau^* < 0,25$$

: charriage par dunes

---

$$\tau^* > 0,25$$

: suspension

$$\tau^* < 2,5$$

: dunes et suspension

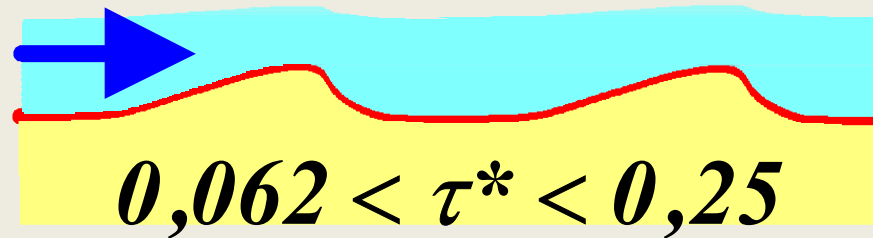
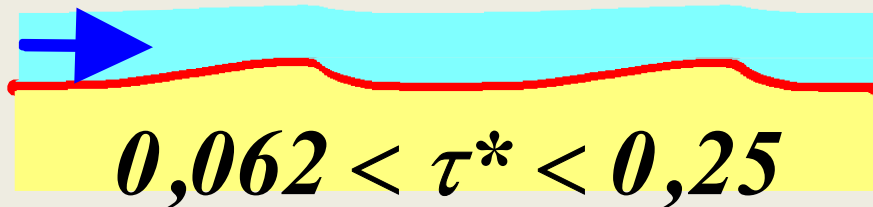
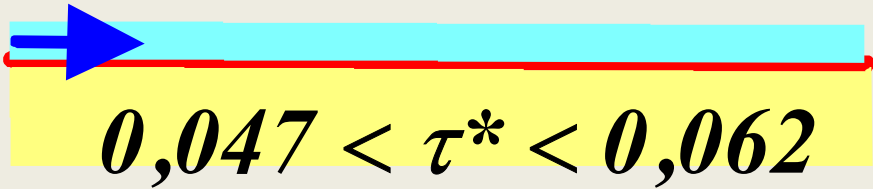
$$\tau^* > 2,5$$

: suspension et fond plat

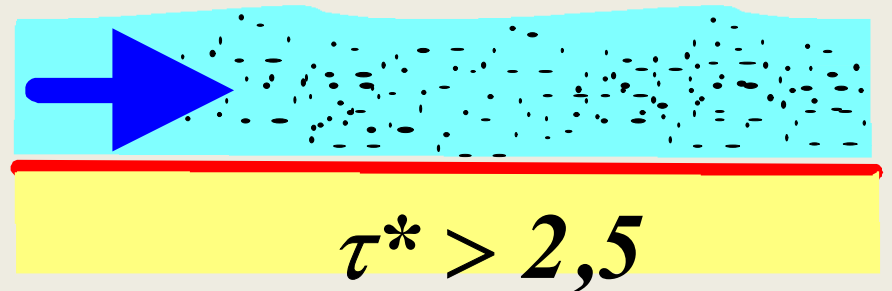
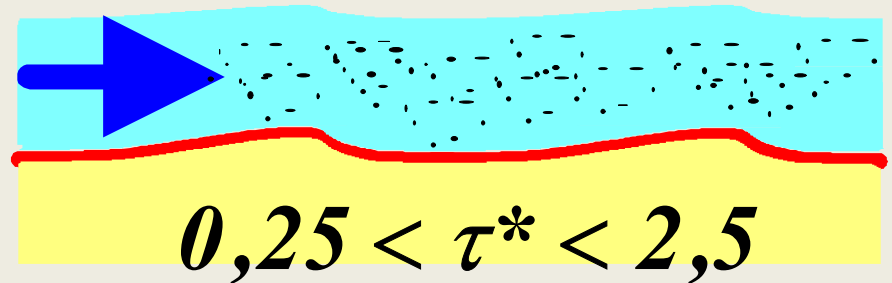
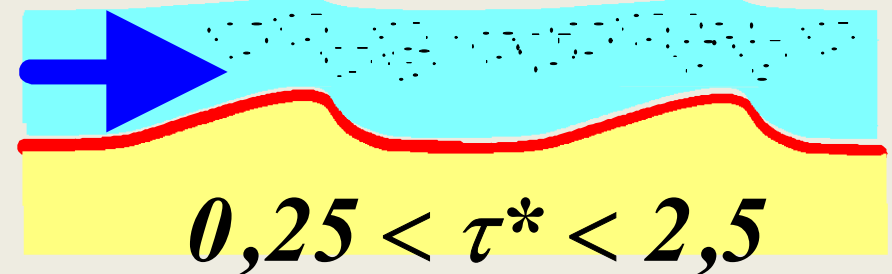
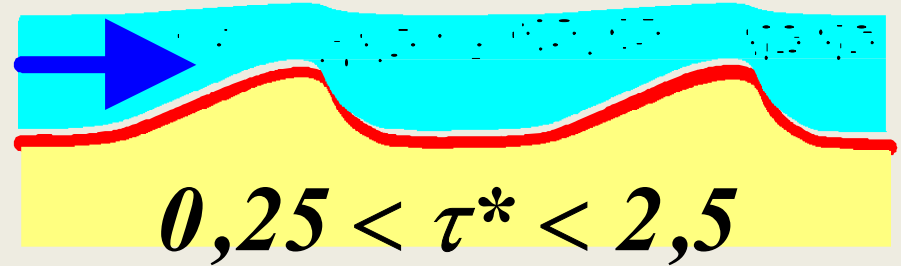
# DUNES

$\tau^* \nearrow$

## Charriage



## Suspension



## 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.

Nous donnons à titre indicatif deux des formules les plus utilisées, l'une pour le charriage seul, l'autre pour le transport solide total. Il existe un grand nombre d'autres formules et le lecteur est invité à se reporter aux ouvrages spécialisés. Ces formules font intervenir la hauteur  $y$  de l'écoulement (directement ou via le paramètre de Shields  $\tau^*$ ).



# CHARRIAGE SEUL : formule de Meyer-Peter et Muller (1948)

$$q_s = 32(\beta \cdot \tau^* - 0,047)^{3/2} d^{3/2}$$

sans vides.

$$\overline{q_s} = q_s / (1 - n)$$

vides compris.

$$\beta = \left( \frac{K}{K_{grain}} \right)^{3/2}$$

Sur fond plat,  $\beta = 1$

M. Ramette limite l'emploi de cette formule au cas où

$$\tau^* < 0,25$$

$q_s$  débit solide en m<sup>3</sup>/s par mètre de largeur de lit

$d$  diamètre médian des sédiments en mètre (souvent aussi noté  $d_{50}$  : diamètre du matériau auquel correspondent 50 % en poids de taille inférieure)

# TRANSPORT SOLIDE TOTAL

## formule d'Engelund

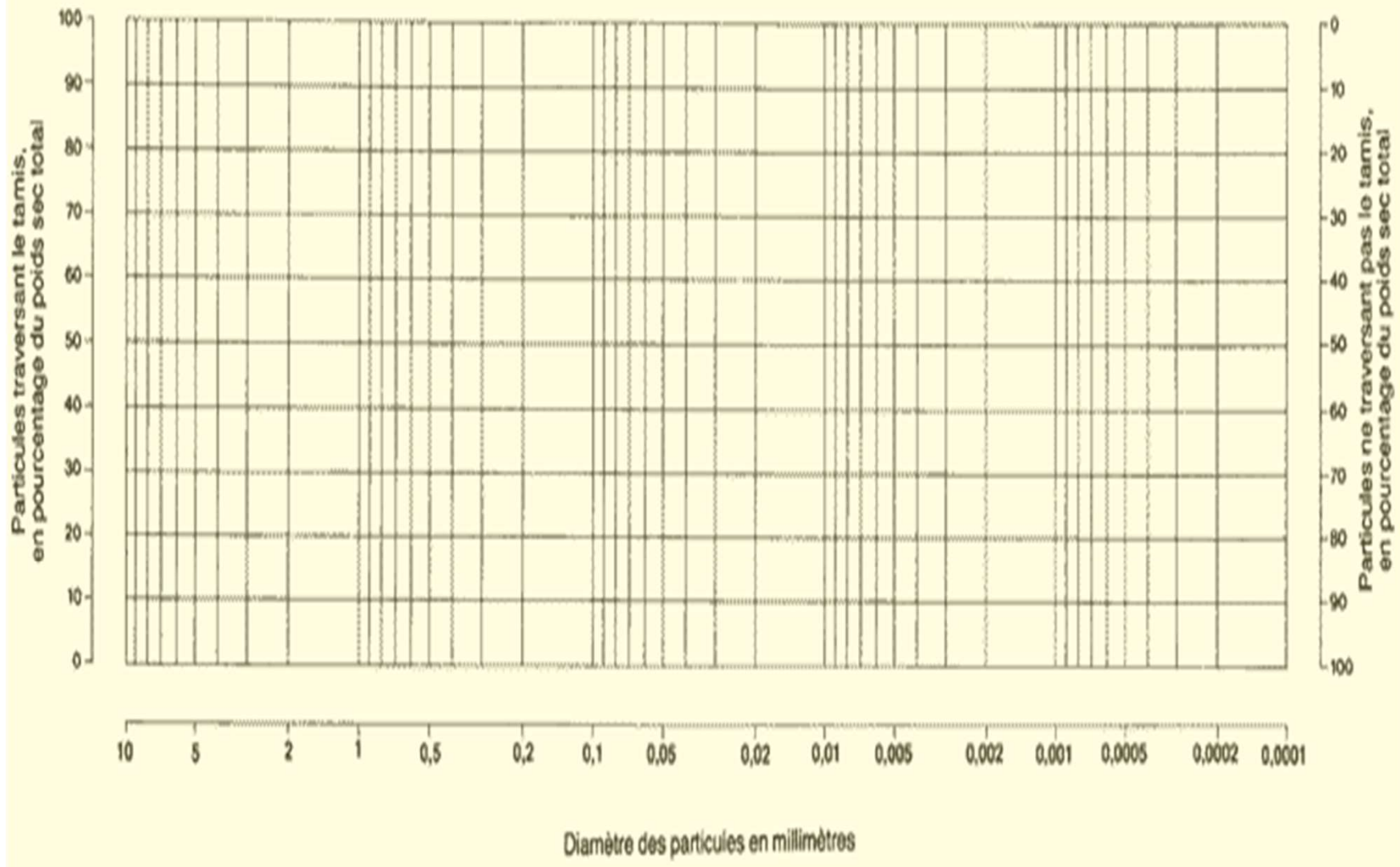
$$\overline{q_s} = 0,010.K^2 .y^{17/6} .i^{5/2} .d^{-1}$$

**vides compris**

$$q_s = (1 - n)\overline{q_s}$$

**sans vides**

$$\tau^* > 0,25$$



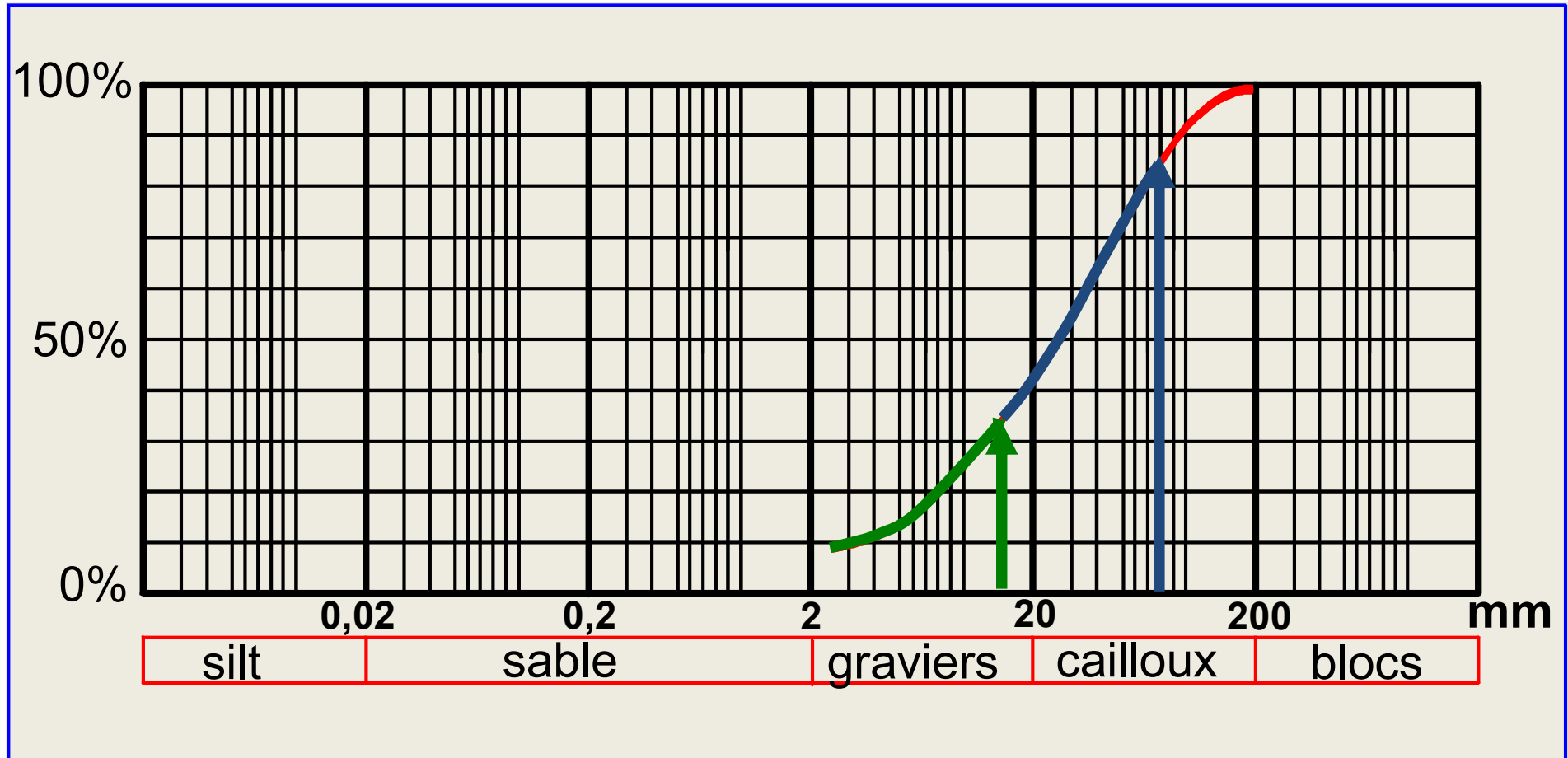
## ***Application 1***

Soit une rivière de pente  $0,2 \%$   
et de profondeur du lit mineur  $3 \text{ m}$ .

**Quelle est la taille des grains transportés en crue ?**

## Application 1

Soit une rivière de pente  $0,2\%$   
et de profondeur du lit mineur  $3\text{ m}$ .



Début du charriage pour :  $\tau^* = y.i / 1,6.d = 0,047 \Rightarrow d = 8\text{ cm}$

Début de la suspension pour :  $\tau^* = 0,25 \Rightarrow d = 1,5\text{ cm}$

## Application 2

Soit une rivière de pente  $i=0,2 \%$ ,  
de profondeur du lit mineur  $3 \text{ m}$ ,  
de largeur  $L=20 \text{ m}$ ,  
de Strickler  $K=25$ ,  
coulant sur un sable  $d=3 \text{ mm}$ .

**Pour un débit donné, y-a-t'il transport solide ?**

## Application 2

Soit une rivière de pente  $i=0,2 \%$ ,  
de profondeur du lit mineur  $3 \text{ m}$ ,  
de largeur  $L=20 \text{ m}$ ,  
de Strickler  $K=25$ ,  
coulant sur un sable  $d=3 \text{ mm}$ .

Le débit mesuré est  $Q=90 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$$y = \left( \frac{Q}{K \cdot L \sqrt{i}} \right)^{3/5} = 2,3 \text{ m}$$

$$\tau^* = \frac{y \cdot i}{1,6 \cdot d} = 0,096 \Rightarrow$$

**charriage (avec dunes)**

### Application 3

Un Oued très large ( $R_h=y$ ) considéré rectangulaire de pente de l'Oued est  $I=0,001$ ; le coefficient de frottement  $\lambda=0,04$ ; La masse volumique de l'eau  $\rho=1000\text{Kg/m}^3$ , La masse volumique des sédiments  $\rho_s=2700\text{Kg/m}^3$ ,  $d_{50}= 4,5\text{mm}$

- a) Monter que la force tractrice de l'écoulement est  $\tau_o = \frac{1}{8} \rho \cdot \lambda \cdot V^2$
- b) Si la contrainte critique des matériaux de fond est  $\tau_{cr} = 0,047 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d_{50}$  ; à partir de quelle vitesse d'écoulement, il y'aura début de charriage.
- c) Si le coefficient de Chézy  $C=44,17$ , le tirant d'eau  $h=0.41\text{m}$  et la largeur du cours d'eau  $b=12\text{m}$ .
- Y a-t-il charriage dans ces conditions ?
  - Si Oui, déterminer le débit de charriage (par unité de largeur  $q_s(\text{kg/s.m})$  et  $Q_s(\text{kg/s})$ )

On donne :  $q_s = 0,85 \cdot (\tau_o - \tau_{cr})^{3/2}$  Avec  $\tau_o = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot I$



Un Oued très large ( $R_h=y$ );  $I=0,001$ ;  $\lambda=0,04$ ;  $\rho=1000\text{Kg/m}^3$ ,  $\rho_s=2700\text{Kg/m}^3$ ,  $d_{50}=4,5\text{mm}$

a) Monter que la force tractrice de l'écoulement est  $\tau_o = \frac{1}{8} \rho \cdot \lambda \cdot V^2$

On sait que :  $\tau_o = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot I \Rightarrow I = \frac{\tau_o}{\rho \cdot g \cdot R_h} \cdot \dots \dots \dots (1)$

et la perte de unitaire :  $J = \frac{\lambda \cdot L}{4R_h} \cdot \frac{V^2}{2g}$  (Darcy weisbach)

D'où la perte de charge unitaire  $j = \frac{J}{L} = \frac{\lambda}{4R_h} \cdot \frac{V^2}{2g} \dots \dots \dots (2)$

En régime uniforme  $I = J \Rightarrow (1) = (2)$

$$\frac{\tau_o}{\rho \cdot g \cdot R_h} = \frac{\lambda}{4R_h} \cdot \frac{V^2}{2g} \Rightarrow \tau_o = \frac{1}{8} \rho \cdot \lambda \cdot V^2$$

b) Vitesse ou il y'aura début de charriage

Si la contrainte critique

$$\tau_{cr} = 0.047 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d_{50} = 0.047 \cdot 9,81 \cdot (2700 - 1000) \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \\ = \boxed{3,527 \text{ N/m}^2}$$

Pour qu'il y est charriage il faut que  $\tau_o = \tau_{cr} = 3.527 \text{ N/m}^2$

$$\text{avec } \tau_o = \frac{1}{8} \rho \cdot \lambda \cdot V^2 \Rightarrow V = \sqrt{\frac{8\tau_o}{\lambda \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 3.527}{0,04 \cdot 1000}} = \boxed{0,84 \text{ m/s}}$$

**Donc le début de charriage aura lieu à partir de  $V=0,84\text{m/s}$**

c) déterminer le débit de charriage par unité de largeur  $q_s(\text{kg/m}^2)$  Si le coef de Chézy  $C=44,17$  et le tirant d'eau  $h=0,41\text{m}$

$$V = C\sqrt{RI} = 44,17 \cdot \sqrt{0,41 \cdot 0,001} = 0,89\text{m/s} > 0,84 \text{ *donc il y'a charriage*}$$

$$\tau_o = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot I \approx \rho \cdot g \cdot h \cdot I = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,41 \cdot 0,001 = \boxed{4,022 \text{ N/m}^2}$$

$$q_s = 0,85 \cdot (\tau_o - \tau_{cr})^{3/2} = 0,85 \cdot (4,022 - 3.527)^{3/2} = \boxed{17,63 \text{ kg/s/m}}$$

$$Q_s = q_s \cdot b = \boxed{211,56 \text{ kg/s}}$$

## Application 4

La vitesse moyenne de l'écoulement d'un cours d'eau est donnée dans le tableau suivant:

Vitesse V (m/s)	0,4	0,6	0,8	1	1,3	1,5
-----------------	-----	-----	-----	---	-----	-----

La pente de l'Oued est  $I=0.001$ ; le coefficient de frottement  $\lambda=0,035$ ; La masse volumique de l'eau  $\rho=1000\text{Kg/m}^3$ , La masse volumique des sédiments  $\rho_s=2500\text{Kg/m}^3$ ,  $d_{50}= 4,5\text{mm}$

- Tracer la courbe de variation de la force tractrice  $\tau_o$  en fonction de la hauteur d'eau h  
«  $\tau_o=f(h)$  »
- Si la contrainte critique des matériaux de fond est  $\tau_{cr} = 0,047 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d_{50}$  ;  
à partir de quelle hauteur, il y'aura début de charriage.
- Si  $\tau_o=4 \text{ N/m}^2$ , déterminer le débit de charriage par unité de largeur  $q_s(\text{kg/s/m})$

$$\text{Avec } q_s = 25 \cdot (\tau_o - \tau_{cr})^{3/2}$$

$$\text{On donne } \tau_o = \rho \cdot g \cdot Rh \cdot I$$

- a) Tracer la courbe de variation de la force tractrice  $\tau_o$  en fonction de la hauteur d'eau  $h$  «  $\tau_o=f(h)$  »

$$\tau_o = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot I \approx \rho \cdot g \cdot h \cdot I \Rightarrow h = \frac{\tau_o}{\rho \cdot g \cdot I}$$

Vitesse V (m/s)	0.4	0.5	0.8	1	1.3	1.5
$\tau_o$ (N/m <sup>2</sup> )	0.70	1.09	2.80	4.38	7.39	9.84
H (m)	0.071	0.111	0.285	0.446	0.754	1.003

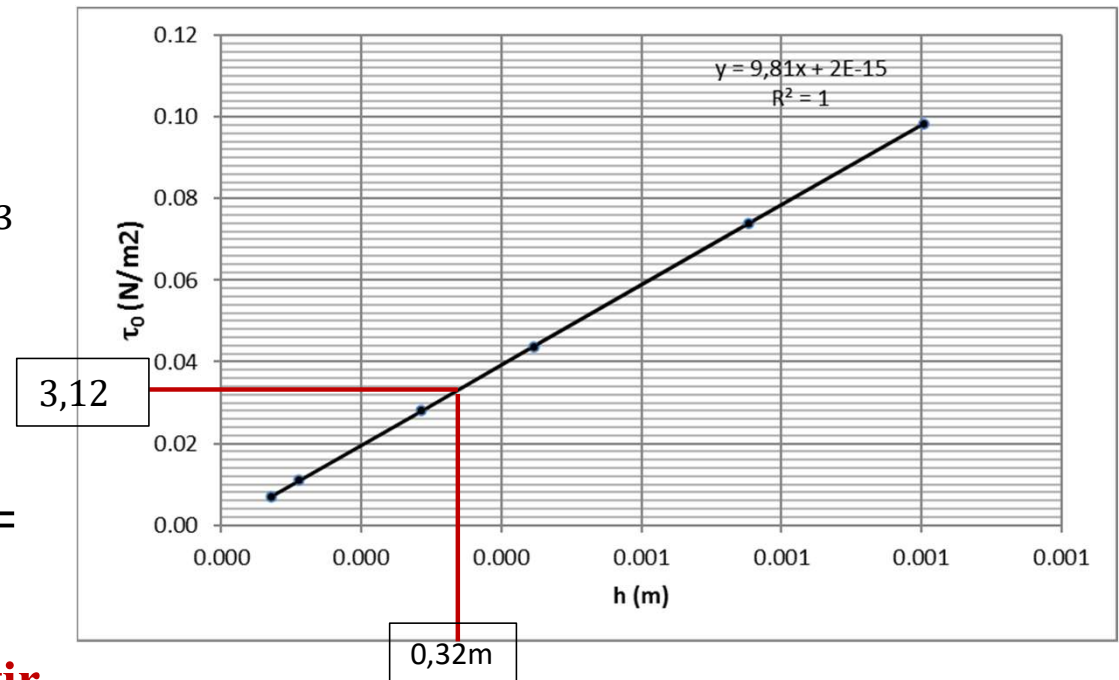
- b) Hauteur où il y'aura début de charriage  
Si la contrainte critique

$$\begin{aligned} \tau_{cr} &= 0.047 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d_{50} \\ &= 0.047 \cdot 9,81 \cdot (2700 - 1000) \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \\ &= 3.117 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Par projection sur la courbe précédente on trouve  $h=0,32\text{m}$

$$\text{Ou directement } h = \frac{\tau_o}{\rho \cdot g \cdot I} = \frac{\tau_{cr}}{\rho \cdot g \cdot I} = \frac{3.527}{9.81} = 0,317\text{m}$$

**Donc le début de charriage aura lieu à partir de  $h=0,32\text{m}$**



- a) Si  $\tau_o=4$  N/m<sup>2</sup>, déterminer le débit de charriage par unité de largeur  $q_s$ (kg/m<sup>2</sup>)

$$q_s = 25 \cdot (\tau_o - \tau_{cr})^{3/2} = 20.74 \text{ kg/s/m}$$

# III. Différents types/techniques de confortement de berges

Hamid BOUCHELKIA

Le but d'un cours d'eau est d'évacuer les eaux de ruissellement provenant des fossés, voies d'eau et de celles provenant du drainage souterrain et des nappes souterraines (sources).

### Principes de base d'un aménagement

Lors de tout projet d'amélioration (augmenter sa capacité ou corriger des problèmes de dégradation) de cours d'eau, l'étude et le design doivent être effectués en respectant les principes suivants :

1. La section du cours d'eau doit être suffisante pour évacuer l'eau sans provoquer d'inondation ou de dégâts importants.
2. Tout aménagement ne devra pas provoquer d'érosion dans le cours d'eau ou sur les berges car cette érosion signifie la modification de la section d'écoulement, la perte de terrain riverain, le transport de sédiments, l'ensablement et l'envasement de la partie en aval du cours d'eau.
3. Les talus du cours d'eau et la section d'écoulement devront être les plus stables possibles pour que le cours d'eau ait la durée de vie la plus longue.
4. Les coûts de construction et d'entretien devront être minimisés ou le rapport bénéfices-coûts devra être maximisé. .

Ce dernier est plutôt difficile à évaluer

## Possibilités d'intervention

Pour augmenter la capacité d'un cours d'eau, l'ingénieur peut envisager différentes possibilités:

**1. Nettoyage des berges :** Le nettoyage des broussailles diminue considérablement le coefficient de rugosité et augmente la vitesse dans la même proportion. Cette mesure est à envisager lorsque l'on permet au cours d'eau de déborder dans la plaine. Dans certains cas, cette mesure est suffisante sans avoir à modifier la section du cours d'eau.

**2. Curage du fond du cours d'eau :**

L'enlèvement des sédiments accumulés restaure la section d'écoulement et l'enlèvement de la végétation diminue le coefficient de rugosité.

**3. Calibrage du cours d'eau :** Le calibrage d'un cours d'eau consiste à lui donner une nouvelle section pour répondre à de nouveaux besoins en débits d'eaux de ruissellement ou en évacuation des eaux de drainage souterrain. Les sections trapézoïdales sont en général les plus populaires lors de la réfection des cours d'eau.

**4. Redressement du cours d'eau :** Un cours d'eau sinueux ralentit l'écoulement. Le redressement consiste à couper les méandres, ce qui contribue à augmenter la vitesse d'écoulement (pente plus grande).

Les deux dernières solutions ne sont pas considérées comme très environnementales et sont très questionnées.

## Introduction

Les berges de certain cours d'eau présentent des phénomènes de dégradation accélérée. L'amélioration du réseau de drainage, le redressement des branches des cours d'eau agricoles, l'accroissement des superficies en cultures annuelles et l'augmentation des événements climatiques extrêmes ont favorisé l'augmentation des débits de pointe et des vitesses d'écoulement et, de ce fait, l'érosion des rives des cours d'eau.

La pente du lit, la direction du courant, l'ampleur du débit de pointe, la présence d'obstacles dans le lit du cours d'eau, la forme des talus, la couverture végétale et la résistance du sol en rive sont autant de facteurs qui doivent être pris en compte dans le cadre d'un diagnostic complet des sites à restaurer visant à sélectionner les travaux de corrections appropriés. Il est important de mentionner que la restauration des berges ne peut régler les problèmes d'érosion provenant des champs. Elle doit donc être envisagée comme un complément aux bonnes pratiques culturales et aux ouvrages hydro-agricoles.

La construction d'ouvrages de protection des rives ne doit pas être effectuée de façon systématique. La sélection d'une solution appropriée doit comprendre, d'une part, une analyse coûts/bénéfices permettant d'établir les objectifs précis. S'agit-il de protéger un bien de grande valeur (bâtiment, terre agricole productive), d'améliorer la qualité de l'eau pour plusieurs usages (réseau d'alimentation en eau potable, baignade, pêche), etc.? D'autre part, il importe de bien mesurer les impacts des aménagements sur les portions amont et aval du cours d'eau.



## Processus conduisant à la dégradation des berges

La dégradation des berges se produit généralement selon un processus qui combine à la fois le **pouvoir érosif de l'eau** et l'**effet gravitaire**. Dans certains cas s'ajoute un phénomène plus particulier : **la bouillance**.

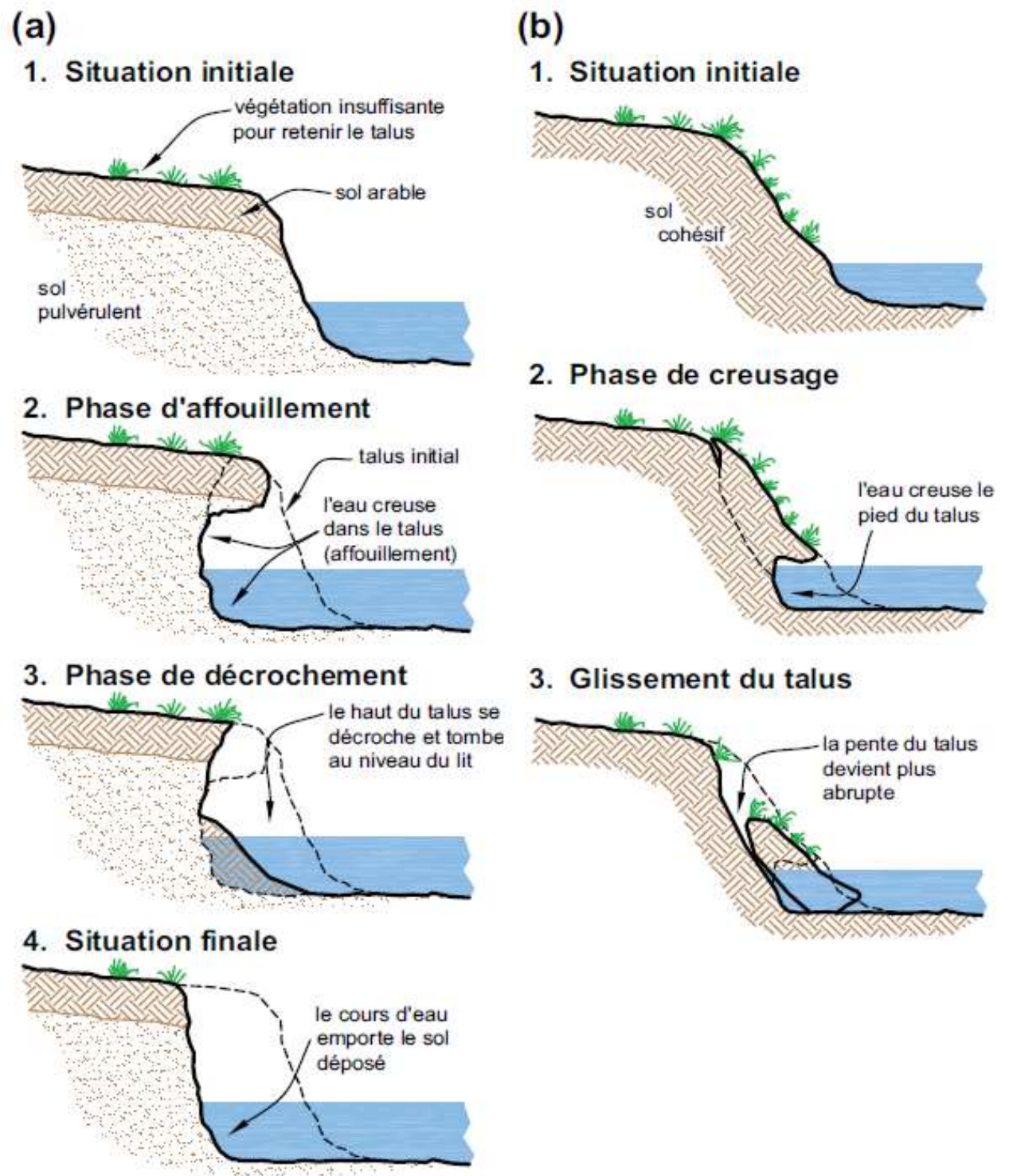
### a. Le pouvoir érosif de l'eau

Lorsque la vitesse du courant et la turbulence arrivent à vaincre le poids des particules et leur force de cohésion, il y a érosion. De ce fait, les sols cohésifs (comme les sols argileux) résistent mieux à l'érosion que les sols pulvérulents (comme les sols sableux). Il est à noter que la force d'arrachement est plus forte lorsque la direction du courant forme un angle avec la surface du sol.

Tout ce qui modifie la direction de l'eau et augmente sa vitesse peut créer des foyers d'érosion. Ainsi, les obstacles dans le cours d'eau, le rétrécissement de la section du cours d'eau, les sorties de drain mal installées, la force centrifuge sur la rive extérieure d'une courbe et la pente forte du cours d'eau sont autant de facteurs qui peuvent contribuer à changer la direction de l'eau ou à augmenter sa vitesse.

De plus, les surfaces de sol à nu résistent moins bien à l'action érosive de l'eau que les surfaces recouvertes de végétation.

L'érosion peut survenir au niveau des berges, mais également dans le lit du cours d'eau; on parle alors de régression de fond. La régression du fond abaisse l'élévation du lit, accentue l'angle du talus et affaiblit sa base. En sol cohésif, elle engendre presque systématiquement un glissement de talus (figure 1).



**Figure 1 : Processus d'érosion de berges rencontré (a) en sol peu cohésif et (b) en sol cohésif lorsque la vitesse de l'eau est importante**

**Source : Luc Lemieux, MAPAQ, adapté de Bentrup G. et Hoag J. C. (1998)**



Figure : Le pouvoir érosif de l'eau

Source : Luc Lemieux, MAPAQ

## b. L'effet gravitaire

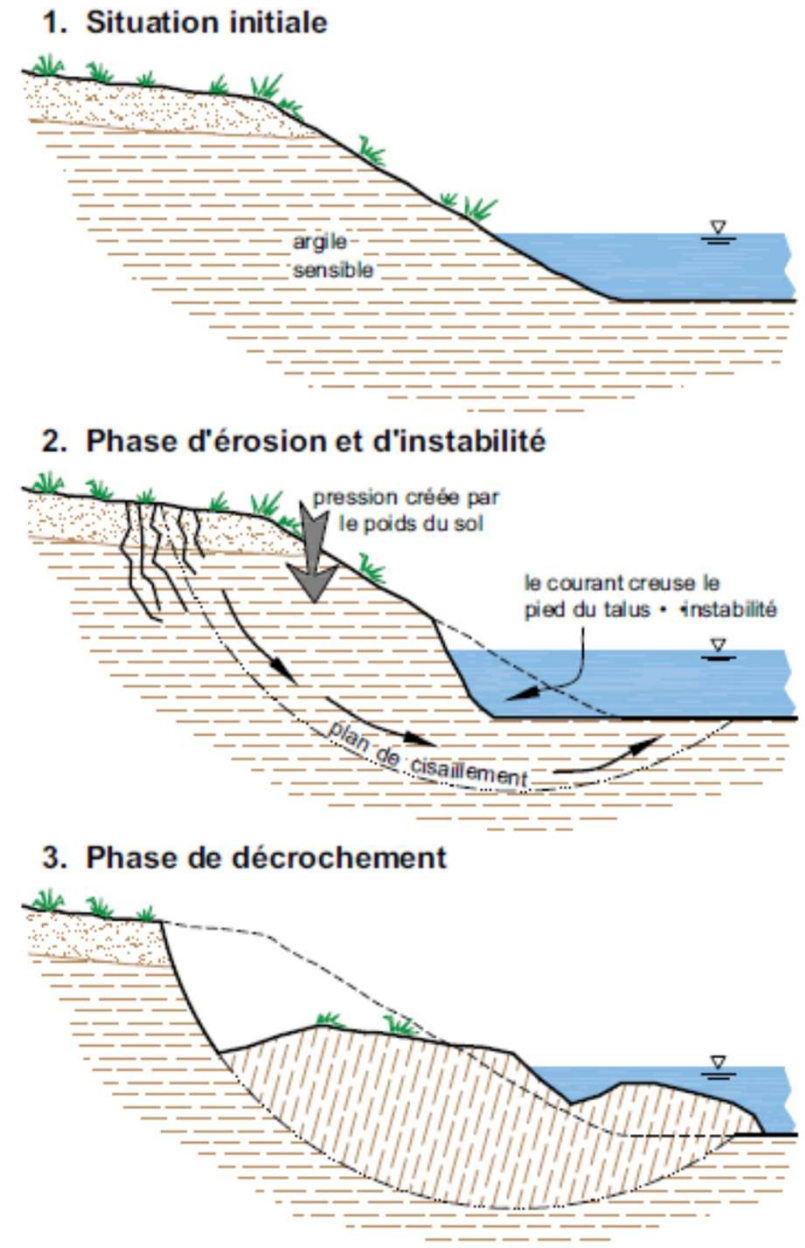
Le glissement des talus survient lorsque les matériaux composant la berge ne peuvent plus résister aux forces gravitationnelles.

Ce mécanisme survient plutôt dans des sols cohésifs qui sont capables de retenir de grandes quantités d'eau, ce qui ajoute du poids à la berge et réduit les forces de cohésion entre les particules (phénomène de lubrification).

Le talus devient encore plus sensible au décrochement. Lorsqu'on augmente la pente ou la hauteur d'un talus, le poids du sol excède éventuellement les forces de cohésion qui le retiennent, le sommet de la berge se fissure et le sol glisse en plaques.

Dans les sols cohésifs, la surface de rupture présente une forme en arc de cercle caractéristique.

Moins les sols sont cohésifs, plus la surface de rupture est droite.



**Figure 3 : Phénomène de rupture de berge en cercle**  
Source : Luc Lemieux, MAPAQ, adapté de USDA-NRCS Stream restoration design handbook, technical note 14A, 2005

Les glissements ont généralement lieu après des pluies abondantes ou lors d'une décrue rapide alors que les berges sont saturées. Toutefois, d'autres circonstances favorisent aussi les glissements, comme les cycles de gel et de dégel ou de saturation et d'assèchement dans certains sols, les vibrations causées par le passage de machinerie trop près de la berge, l'ajout d'une charge sur la rive (remblais, arbres de forte taille), l'accumulation d'eau le long de la berge due à une raie de curage faite par un labour, etc.



### c. La boulangance

Le glissement s'observe aussi fréquemment lorsqu'il y a résurgence de la nappe phréatique dans le talus. Les sols stratifiés où un horizon de sol pulvérulent se trouve sur un horizon de sol cohésif sont les plus sensibles à ce type d'érosion. Le phénomène résulte de la pression de la nappe phréatique sur la berge lorsque le niveau de celle-ci est supérieur au niveau de l'eau dans le cours d'eau. Ce phénomène se nomme « boulangance ».

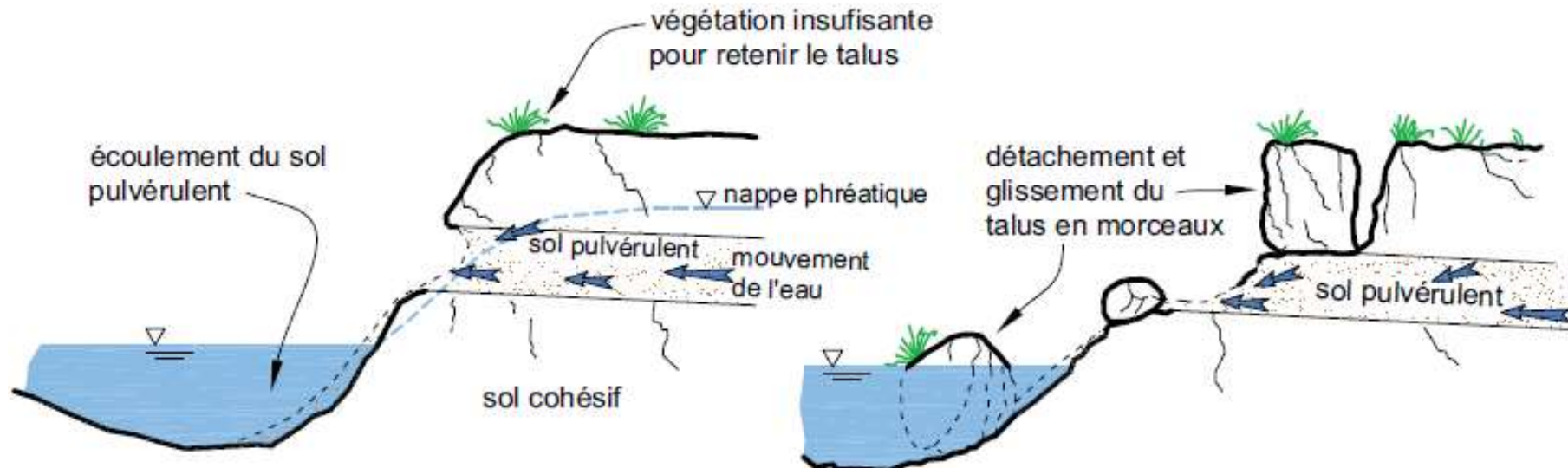


Figure 2 : Phénomène de boulangance,

Source : Luc Lemieux, MAPAQ, adapté de Bentrup G. et Hoag J. C. (1998)



## Différents types de confortement de berges

### **Enrochements:**

Cette technique consiste à ériger le long de la berge un "mur" en rochers d'épaisseur variable et de combler l'espace laissé vide par un matériau meuble, par exemple de la terre, du sable ou des graviers,

### **Gabions**

Enveloppes de grillage remplies de pierres, confectionnées sur leur lieu d'implantation. Leur souplesse leur permet de s'adapter à l'évolution du lit de la rivière. Leur valeur esthétique est faible mais peut être améliorée par végétalisation,

### **Matelas-gabions**

Matelas construits sur le principe des gabions d'environ 20cm d'épaisseur. Ils sont plus discrets que les gabions et se végétalisent plus facilement. Ils s'adaptent bien en cas d'évolution du lit et des berges.

### **Palplanches**

Feuilles de métal épais préformées et emboîtables les unes dans les autres. Protection rigide à réserver à des usages précis: restauration de chaussées, consolidation d'anciennes protections, de ponts...



Enrochement



Matelas-gabions et gabions



palplanches



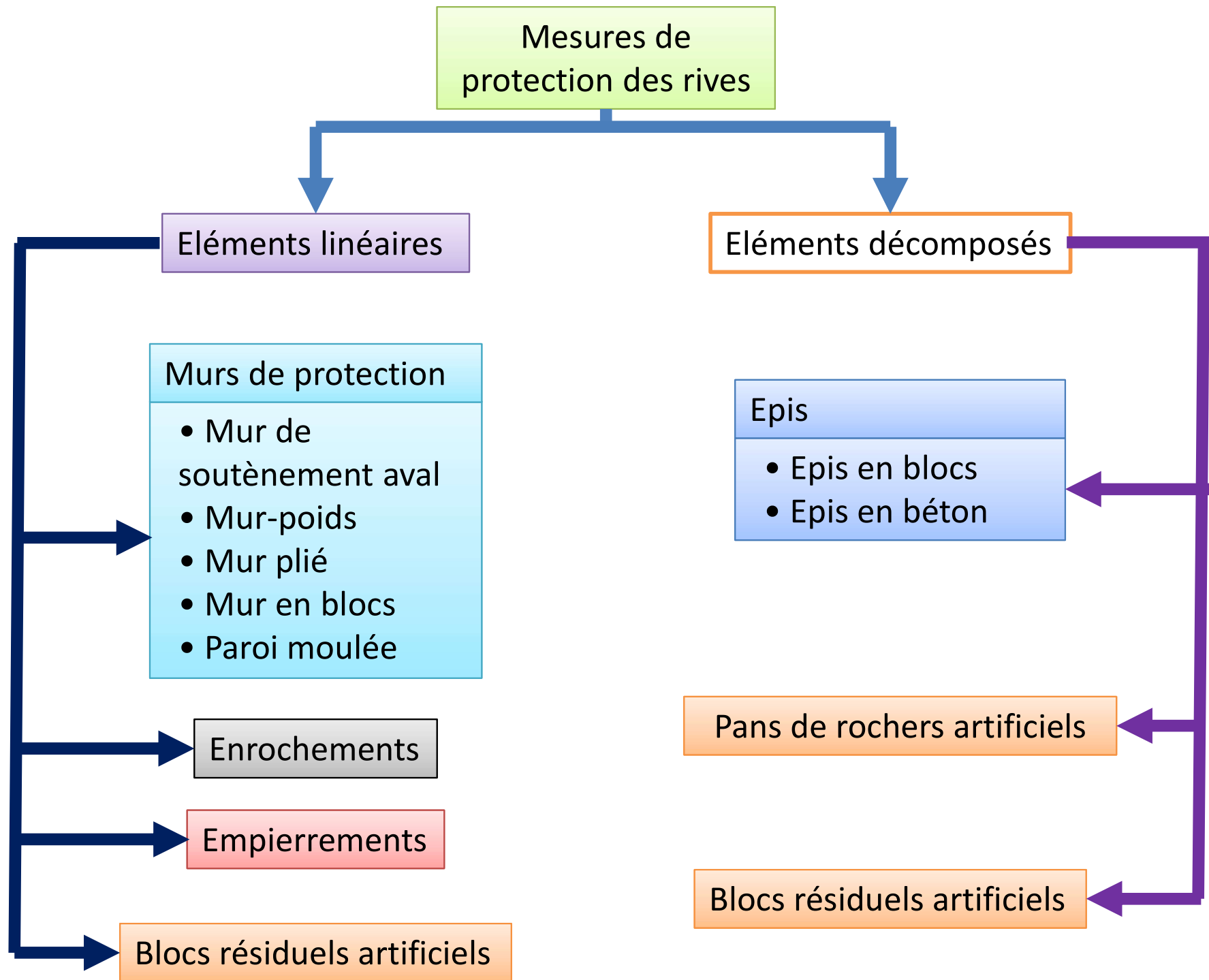
## CHOIX DE L'OUVRAGE

- Avant d'entreprendre un projet de stabilisation des berges d'un cours d'eau il convient de déterminer la cause de l'érosion, d'établir le niveau de protection requis et d'utiliser la technique appropriée, en tenant compte de la pente des berges, de l'esthétique et de l'information propre au site.
- Concevoir les ouvrages de sorte à ce qu'ils résistent aux débits de pointe.

Le principal inconvénient de ces techniques est de modifier le régime hydraulique de la rivière le long du linéaire mis en place. L'écoulement est en effet accéléré car on a diminué la rugosité de la berge. Ainsi il existe des risques de déstabilisation de la berge en amont, en aval ou en rive opposée de l'ouvrage.

La mise en place de tels ouvrages doit donc être réservée à des zones à conforter proches des habitations ou lorsque l'érosion présente un risque pour la sécurité publique.

Avant tout projet de mise en œuvre de l'une de ces techniques qui sont lourdes des solutions alternatives doivent être recherchées afin de limiter au maximum la stabilisation de la berge. Ces solutions peuvent être combinée à une solution végétale, on parle alors de technique mixte.



## Enrochement

Il se présente parfois des situations de cours d'eau naturels ou de canaux où il est impossible de construire ou d'aménager en respectant les critères de stabilité précédemment définis. Lorsque le sol ne permet pas des conditions suffisamment stables, il faut rendre le cours d'eau et les structures résistants à l'érosion en les protégeant.

L'utilisation de cailloux, de roches et plus récemment de roc concassé s'est montrée une solution intéressante pour protéger les cours d'eau et les canaux de l'érosion et réaliser certaines structures hydrauliques. Les roches et les cailloux sont des matériaux souvent disponibles et accessibles près de plusieurs chantiers. Pour être efficace, leur utilisation dans des projets d'hydraulique nécessite une bonne connaissance de leurs propriétés et des lois de l'hydraulique.

Les roches, les cailloux ou la pierre concassée peuvent être utilisés pour protéger le fond des cours d'eau, leurs talus et construire des barrages et des seuils dissipateurs d'énergie.



## DIMENSIONS ET ANGLE DE REPOS

Les cailloux et les roches peuvent être de différentes formes : sphérique, arrondie, cubique, angulaire ou allongée.

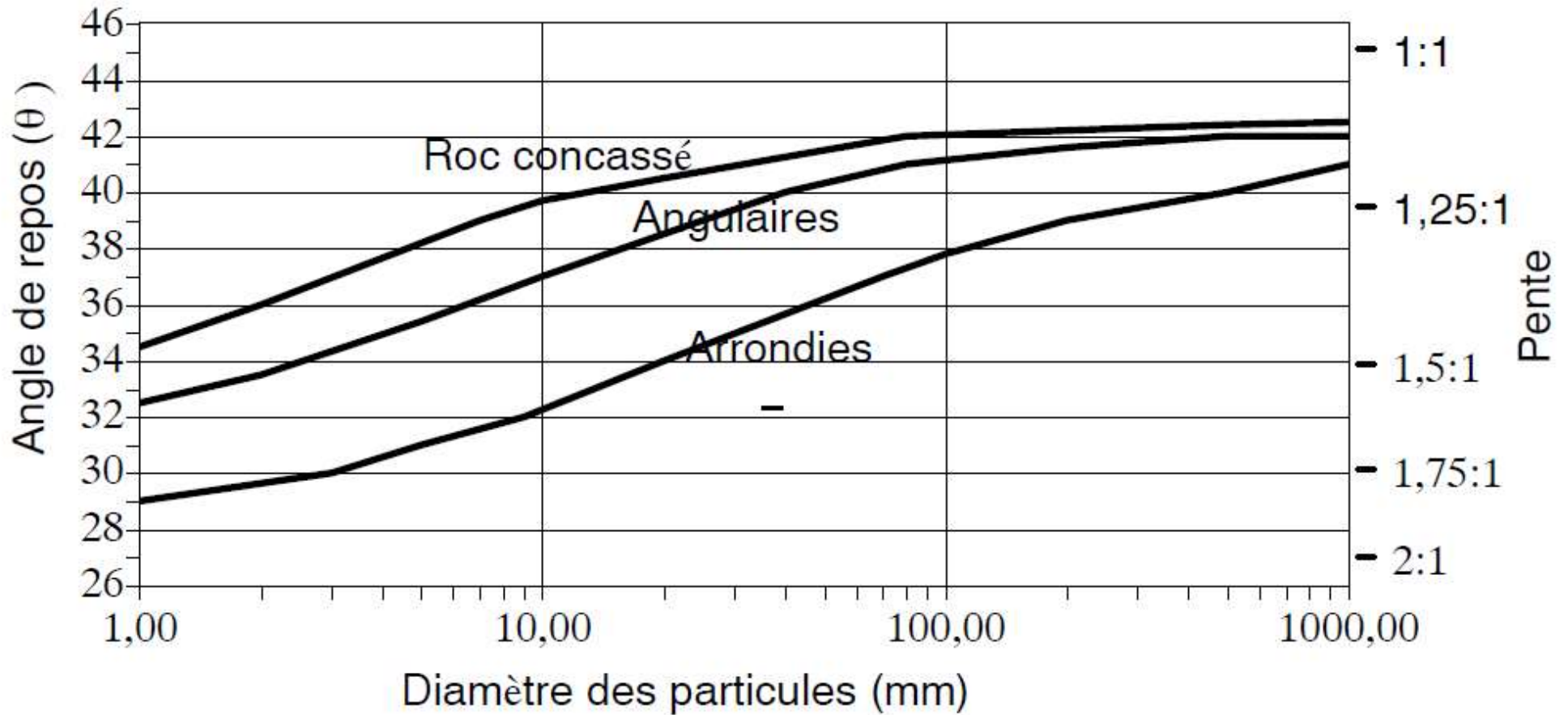
La dimension des petits cailloux est généralement déterminée par tamisage. Les tamis sont constitués de mailles carrées et la dimension des cailloux tamisée est définie comme la largeur de l'ouverture entre les mailles au travers duquel la roche ou le cailloux passe pour être retenue sur le tamis aux mailles de plus petites dimensions.

Pour un cailloux arrondi ou sphérique, la dimension des mailles du tamis sera plus grande que la dimension moyenne.

Pour les cailloux de forme allongée, la plus petite section du cailloux passera dans l'ouverture des mailles du tamis de sorte que la dimension moyenne sera près de l'ouverture des mailles du tamis.

Pour la stabilité des roches dans les structures hydrauliques, Stephenson (1979) considère que c'est la surface exposée à l'écoulement qui est importante. La plus grande face est souvent la plus critique et la plus petite dimension de cette face contrôle la stabilité.

L'angle de repos des pierres et des cailloux dépend de leur grosseur et de leur angularité comme le montre la figure 3



**Figure 3 Angle de repos du matériel granulaire (d'après, Simons, 1961).**

Rappel début du charriage

Contrainte de cisaillement

$$\tau = \gamma_w \cdot R \cdot I = \gamma_w \cdot h \cdot I$$

car  $R \approx h$  si  $b \gg h$

Contrainte de cisaillement adimensionnelle

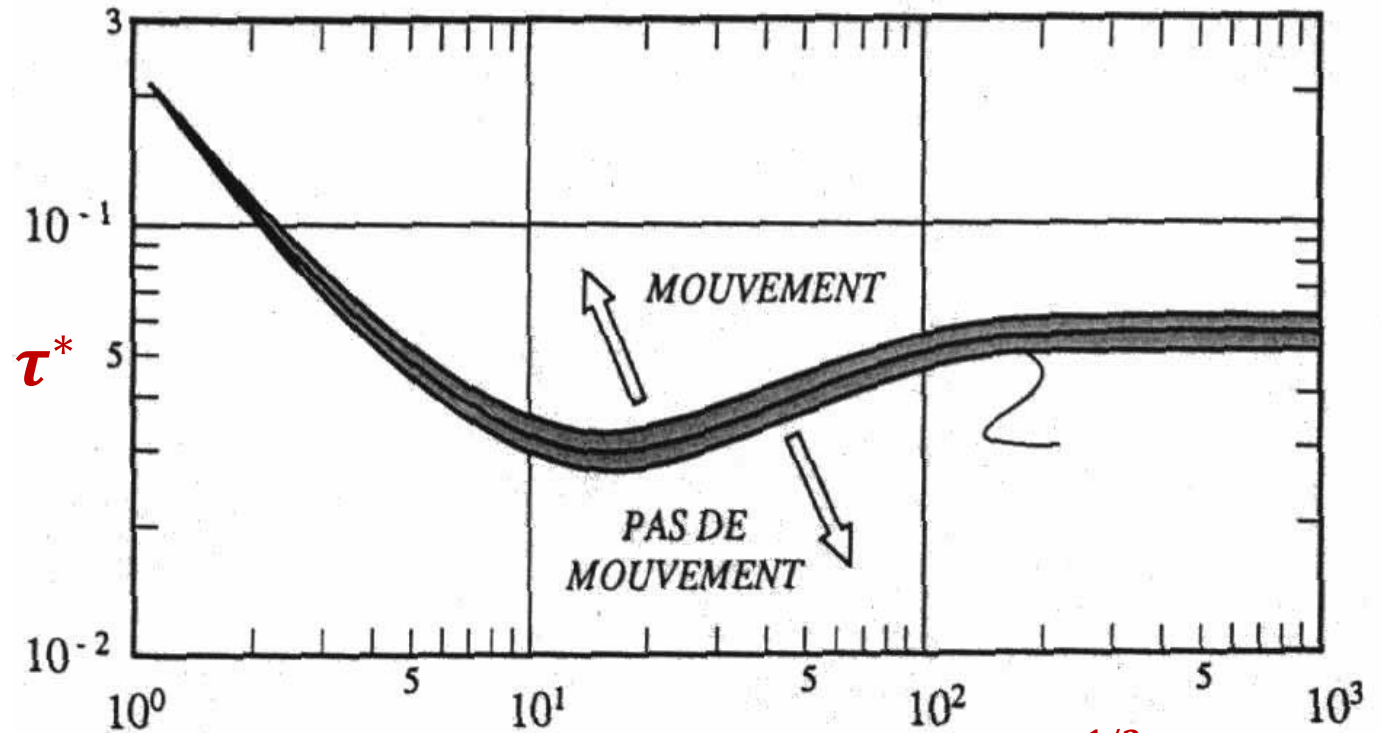
$$\tau^* = \frac{\tau}{\rho g (s - 1) d} = \frac{h \cdot I}{\rho g (s - 1) d}$$

$h$  : hauteur d'eau

$I$  : pente de frottement

$d$  : diamètre des grains

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} = 2.6 \text{ à } 2.7$$



Diamètre adimensionnel  $d^* = d \cdot \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{g}{v^2} \right)^{1/3}$

Diagramme de Shields

## Théorie du charriage - début du mouvement

### 1 Sous-couche du lit

(charriage permanent)

Hauteur d'eau  $h_c$  pour laquelle le début du mouvement se produit:

$$h_c = \frac{\tau_c^* (s - 1) d_m}{I}$$

### 2 Pavage du lit

Hauteur d'eau  $h_c$  pour laquelle le pavage du lit est détruit.

a) avec  $d_m = d_{90}$

$$h_c = \frac{\tau_c^* (s - 1) d_{90}}{I}$$

$I$  : pente de frottement.

$\tau_c^*$  : contrainte de cisaillement critique adimensionnelle

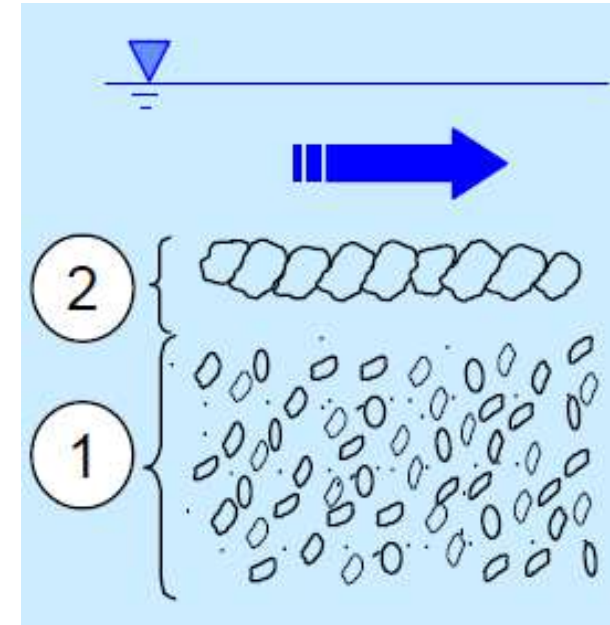
$\tau_c^* > 0,047$  charriage bien développé.

$\tau_c^* = 0,03 - 0,047$  pas de charriage régulier.

$\tau_c^* < 0,03$  aucun mouvement.

$d_m$  : diamètre moyen des grains de la sous-couche.

$s$  : densité spécifique  $s = \rho_s / \rho$ .





Dans le cas des matériaux de la berge, La force tractrice sur une pente d'angle  $\beta$  (cas des berges), avec l'horizontale vaut:  $\tau_{\beta} = \tau \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \varphi}}$

$\varphi$  est l'angle de repos du matériau, toujours supposé sans cohésion.

## Stabilisation des berges - Dimensionnement des enrochements

### Contraintes de cisaillement maximales sur les berges

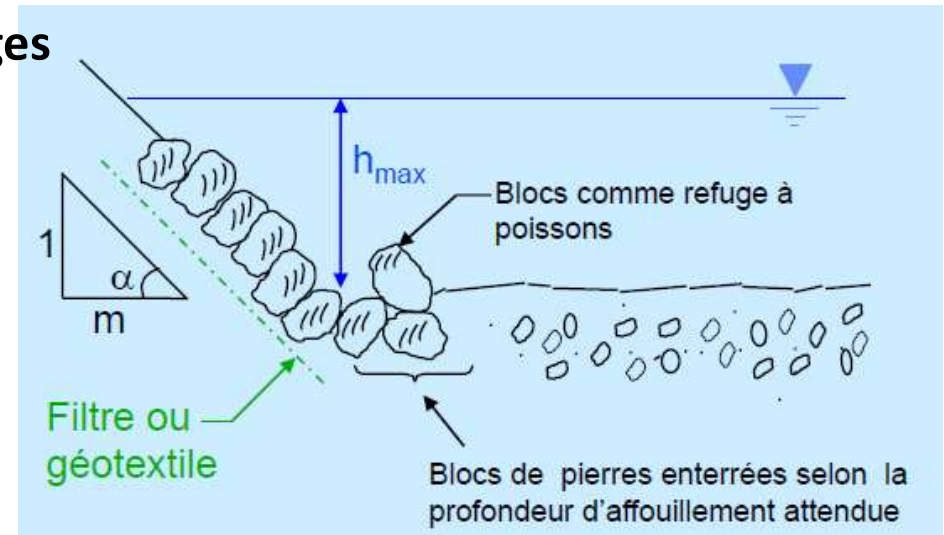
$$\tau_{Rma} = \rho \cdot g \cdot h_{max} \cdot I \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \varphi}}$$

$$\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \varphi}} \approx 0,77 \Rightarrow \tau_{Rmax} = 0,77 \rho g \cdot h_{max} \cdot I$$

### Contraintes de cisaillement adimensionnelles

$$\tau_c^* = \frac{\tau_{Rmax}}{\rho g (s - 1) d_B} = \frac{0,77 \cdot h_{max} \cdot I}{(s - 1) d_B}$$

$$\Rightarrow d_B = \frac{0,77 \cdot h_{max} \cdot I}{(s - 1) \tau_c^*}$$



$h_{max}$  : hauteur d'eau maximale sur les berges

$I$  : pente de frottement

$s$  :  $s = \rho_s / \rho = 2.65$

$d_B$  : diamètre des blocs

La taille de roche effective  $d_B$  requise pour stabiliser une berge sous la contrainte de cisaillement appliquée  $\tau_0$  est estimée à partir de la relation de LANE

$$d_B = \frac{\tau}{\tau_c^* \cdot \rho \cdot g \cdot (s - 1) \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \varphi}}}$$

où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement appliquée,  $S$  densité de la roche, respectivement,  $\beta$  est l'angle de talus,  $\varphi$  est l'angle de repos de l'enrochement, et  $\tau_c^* c$  est la valeur critique du paramètre de Shields.

# Dimensionnement des enrochements selon Stevens et al

Procédure de dimensionnement



$$\eta = \frac{\tau^*}{\tau_c^*} = \frac{1}{\tau_c^*} \cdot \frac{\tau}{\rho g (s - 1) d_B}$$

$$= \frac{0,77 \cdot h_{max} \cdot I}{\tau_c^* \cdot (s - 1) d_B}$$

$$\eta = \frac{\zeta \cdot h_{max} \cdot I}{\tau_c^* \cdot (s - 1) d_B}$$

$$\xi = \eta \frac{S_m}{\cos \beta} ; S_m = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}$$

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

$h_{max}$  : hauteur d'eau maximale sur les berges

$I$  : pente de frottement

$s$  : densité spécifique  $s = \rho_s / \rho$ .

$\tau^*$  : contrainte de cisaillement adimensionnelle

$\tau_c^*$  : contrainte de cisaillement adimensionnelle critique

$\tau_c^* = 0.047$  en général ( $\zeta = 16.17$ )

$\tau_c^* = 0.1$  pour des rivières de montagnes avec des gros blocs dans le lit ( $\zeta = 7.7$ )

$\eta, \xi$  : facteurs de dimensionnement selon Stevens et al

$\alpha$  : angle du talus avec l'horizontale ( $\tan \alpha = 1:m$ )

$\varphi$  : angle d'un talus d'enrochements stable sans écoulement (angle de repos):

blocs < 1t -->  $\varphi = 40 - 45^\circ$ .

blocs > 1t -->  $\varphi = 45 - 60^\circ$ .

$S_m$  : coefficient de sécurité sans écoulement

**NB: Verifier S : coefficient de sécurité ( $S_{min} = 1.0 / 1.3$  selon conditions)**

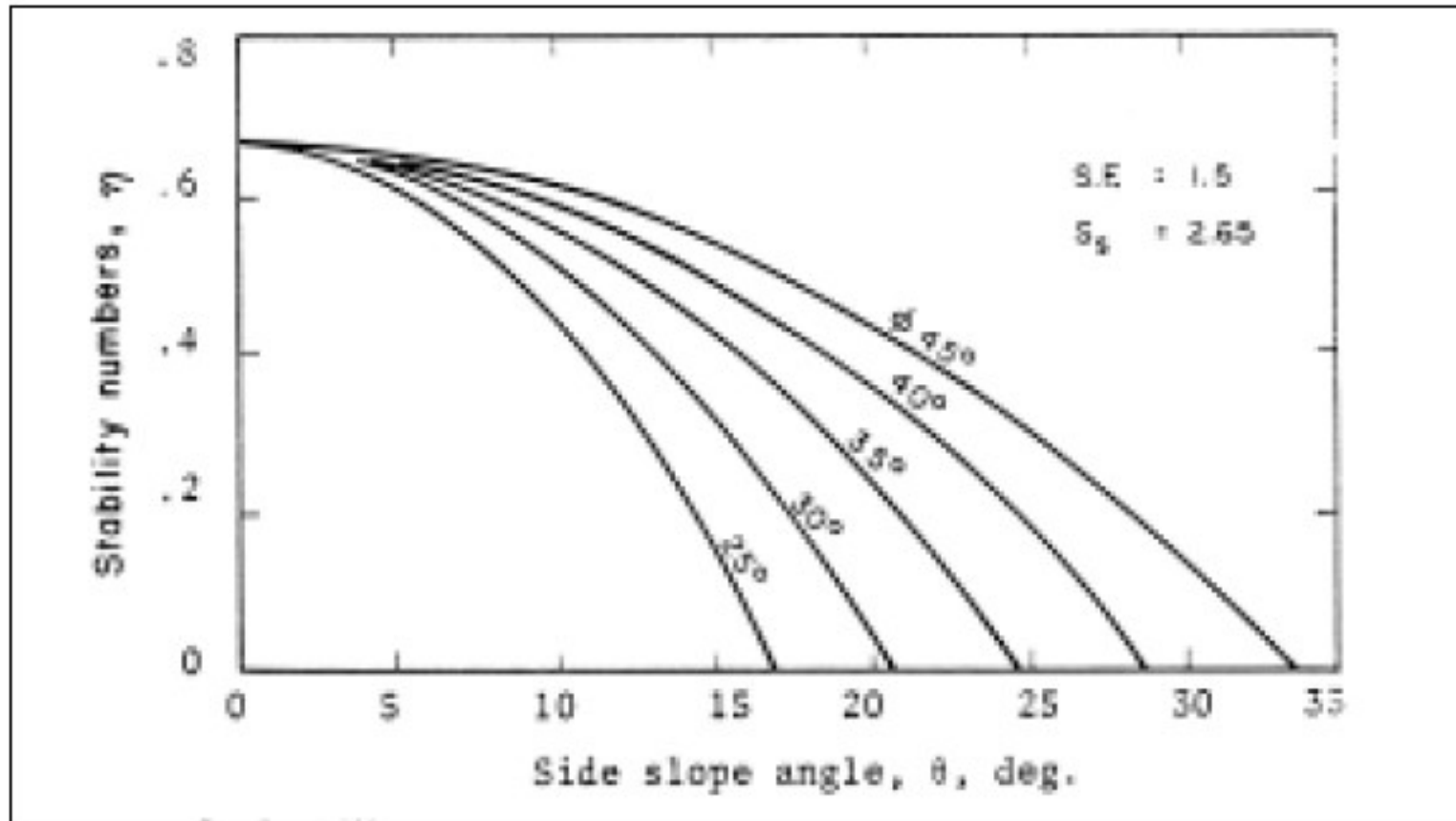


Figure : facteur  $\eta$  un facteur de stabilité de  $S = 1,5$  pour un écoulement horizontal le long d'une pente latérale.

Facteur  $\eta$  peut être calculé par la formule:

$$\eta = \frac{S_m^2 - S^2}{S \cdot S_m^2} \cos \beta$$

## Profil de vitesse et force de traction

Dans la conception d'enrochement, il est souvent souhaitable de relier la force de traction (contrainte de cisaillement) agissant sur le lit ou la rive en enrochement à la vitesse du fluide au voisinage de l'enrochement. Pour un écoulement entièrement turbulent, la vitesse de référence  $V_r$  à une distance  $D_{50}$  au-dessus du lit est déterminée à partir de l'équation :

$$V_r = 2.5 V_* \ln \left( 30.2 \frac{D_{50}}{D_{50}} \right) = 8.52 V_* = 8.52 \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}}$$

Ainsi, la relation entre  $V_r$  et  $\tau_o$  est:

$$\tau_o = \frac{\rho V_r^2}{72}$$

La relation n'est valable que pour un écoulement uniforme dans de larges canaux prismatiques dans lesquels le flux est entièrement turbulent. Pour la conception de l'enrochement, l'équation précédente peut être utilisée lorsque l'écoulement s'accélère, par exemple à l'extrémité de digues. L'équation ne doit pas être utilisée dans les zones où le débit décélère ou au-dessous des structures de dissipation d'énergie. Dans ces zones, la contrainte de cisaillement est plus grande que celle calculée par l'équation précédente

On peut aussi démontrer (Richardson et al., 1975) que la vitesse de référence  $V_r$  est liée à la vitesse contre la pierre  $V_s$  ( $V_r = 1,4 V_s$ ).

La méthode No I du U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 1994) propose l'équation suivante :

$$\frac{d_{30}}{h} = S \cdot C_s \cdot C_v \cdot C_t \left[ \left( \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{0,5} \left( \frac{V}{\sqrt{g \cdot h \cdot K}} \right) \right]$$

$K$  = facteur de correction pour la pente du talus

$$= \sqrt{1 - \sin^2 \beta / \sin^2 \varphi}$$

$\beta$  = angle du talus par rapport à l'horizontale

$\varphi$  = angle de repos des cailloux ou des roches

$S$  = facteur de sécurité (1.1 -- 1,5)

$h$  = profondeur locale de l'écoulement

$C_s$  = coefficient de stabilité

$C_v$  = coefficient de distribution verticale de la vitesse

$$D_{50} = D_{30} \cdot (D_{85} \setminus D_{15})^{1/3}$$

$C_t$  = coefficient d'épaisseur

Pour la protection du lit d'un canal ou d'un cours d'eau,  $K = 1$  puisque  $\beta \cong 0$ . Le coefficient de stabilité  $C_s$  est égal à 0,30 pour les pierres angulaires et 0,375 pour les pierres rondes. Le coefficient de distribution verticale de la vitesse  $C_v$  est égal à 1,0 pour les canaux droits et peut atteindre 1,283 dans les courbes. Le coefficient d'épaisseur  $C_t$  est égal à 1,0 lorsque l'épaisseur de l'enrochement est égale au  $d_{100}$ .

En résumé, les expressions suivantes pour  $\eta$  sont équivalentes

$$\eta = \frac{21 \tau_o}{(S_s - 1) \gamma D_s}$$

$$\eta = \frac{0.30 V_r^2}{(S_s - 1) g D_s}$$

$$\eta = \frac{0.60 V_s^2}{(S_s - 1) g D_s}$$

$$\eta = 0.30 \left\{ \frac{3.4}{\ln \left( 12.3 \frac{y_o}{D_s} \right)} \right\}^2 \frac{V^2}{(S_s - 1) g D_s}$$

**Exercice 1:** (Calcul de la taille de l'enrochement dans les canaux droits.) Déterminer la taille des enrochements requis pour stabiliser les berges d'une rivière droite compte tenu de la largeur de la rivière  $L = 300$  m, de la profondeur de l'écoulement  $h = 7$  m et de la pente du chenal de  $S = 60$  cm/km. La pente de la berge est  $\beta = 30^\circ$ , la densité de la roche  $s$  est 2,7 et l'angle de repos est  $\phi = 40^\circ$ .

**Exercice 2:**

Dans une situation de conception, l'eau s'écoule parallèlement à un remblai en enrochement concassé ( $s=2,65$ ), avec un angle d'inclinaison  $\beta = 20^\circ$ .

(a) Si la contrainte de cisaillement est  $\tau = 95,8$  N/m<sup>2</sup>, calculer la taille de l'enrochement donnant un facteur de stabilité égal à 1,5.

(b) Pour la même contrainte de cisaillement de conception  $\tau = 95,8$  N / m<sup>2</sup>, déterminer le facteur de stabilité des roches de tailles de  $D_m = 0,15$  m, est-il stable?.

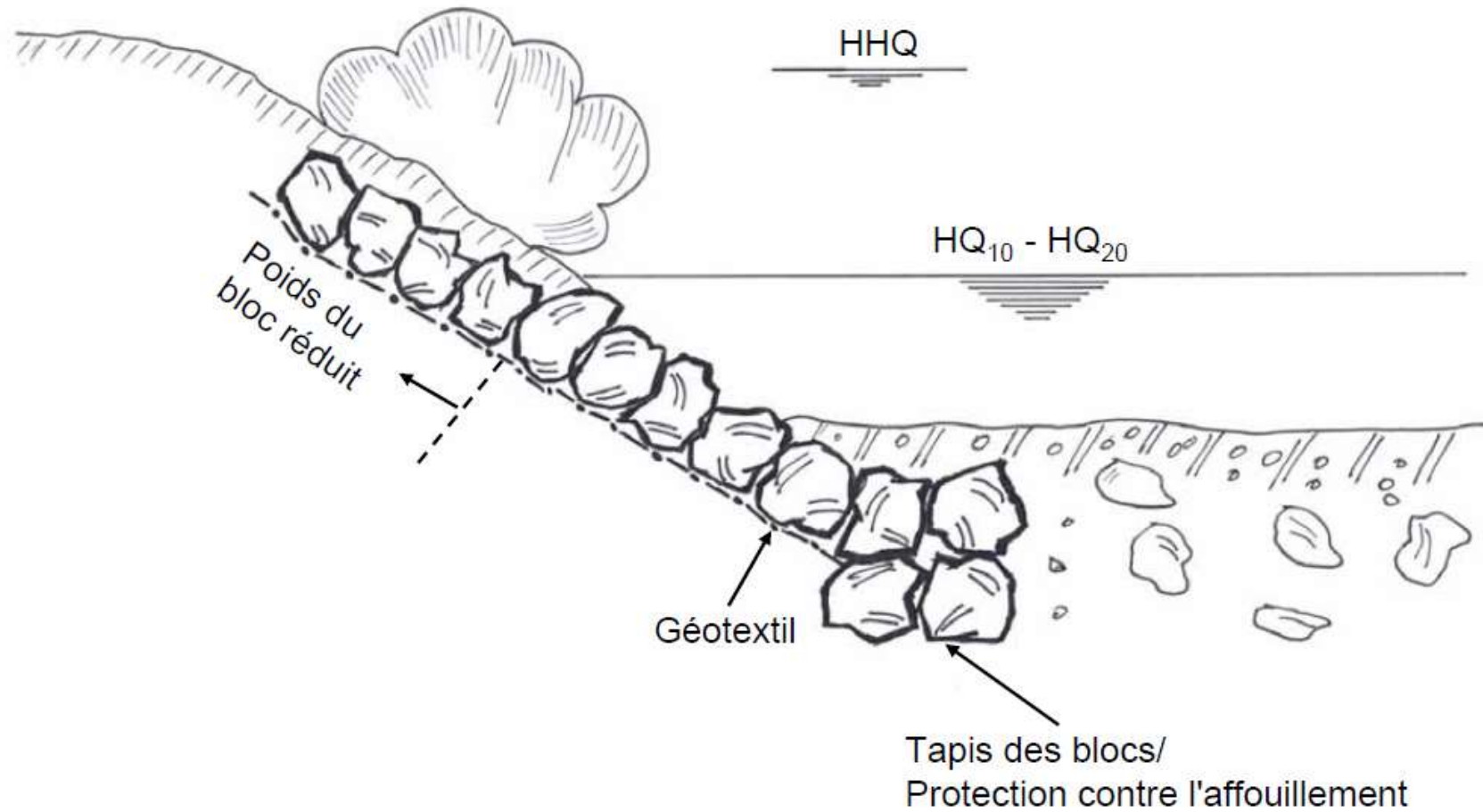
(c) Déterminer la taille de l'enrochement  $D_m$  pour une pente latérale. L'angle de pente latérale  $\beta = 20^\circ$ ; roche très angulaire avec angle de repos  $\phi = 40^\circ$ ; vitesse du fluide au voisinage de l'enrochement  $V_r = 3,66$  m/s;  $y = 3,05$  m;  $S = 1,1$  et  $D_{85} / D_{15} = 2,0$ .

(d) Comparer la taille calculée en (c) avec une taille d'enrochement calculée à l'aide de l'équation du Corps of Engineers des États-Unis.

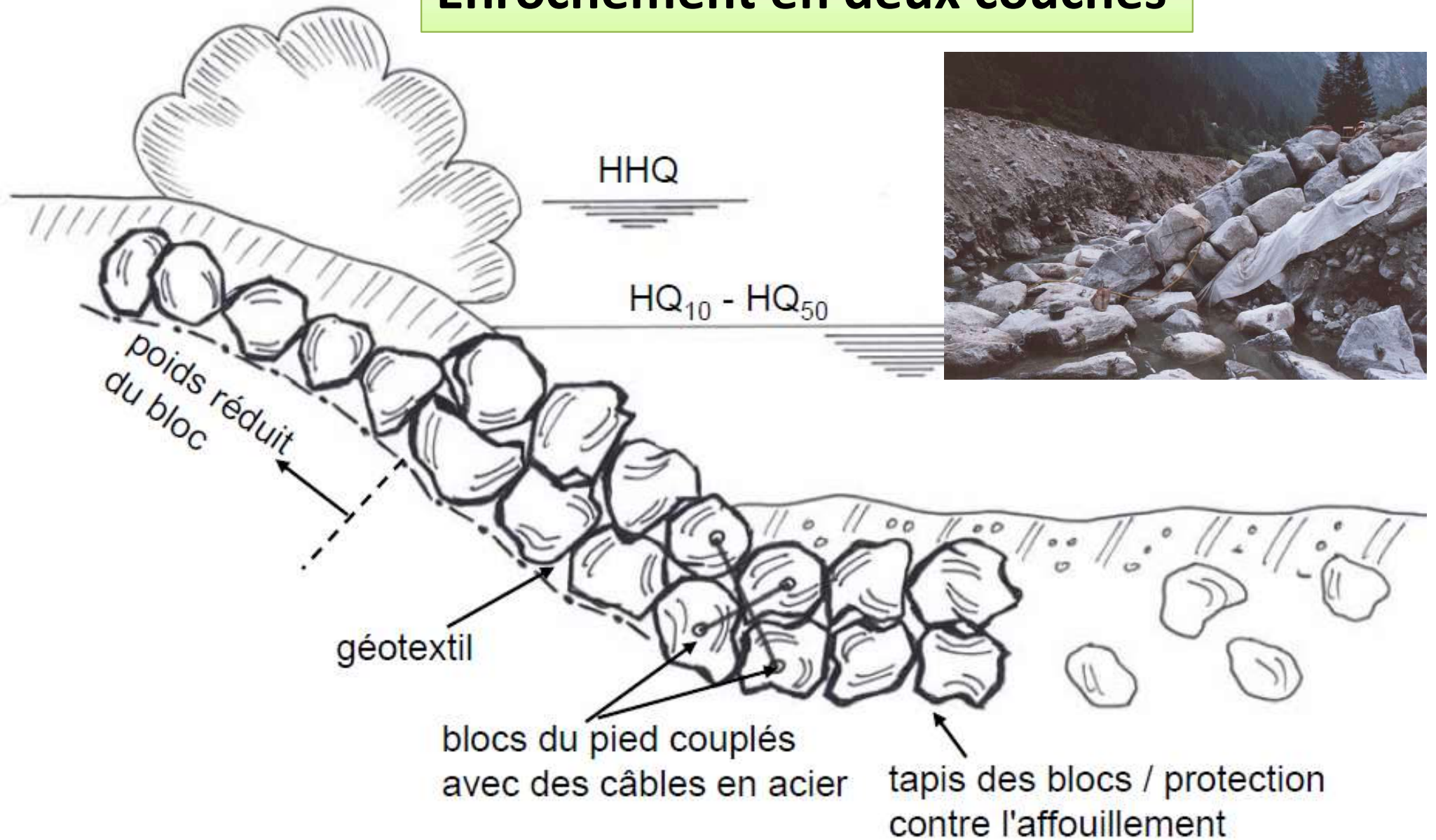




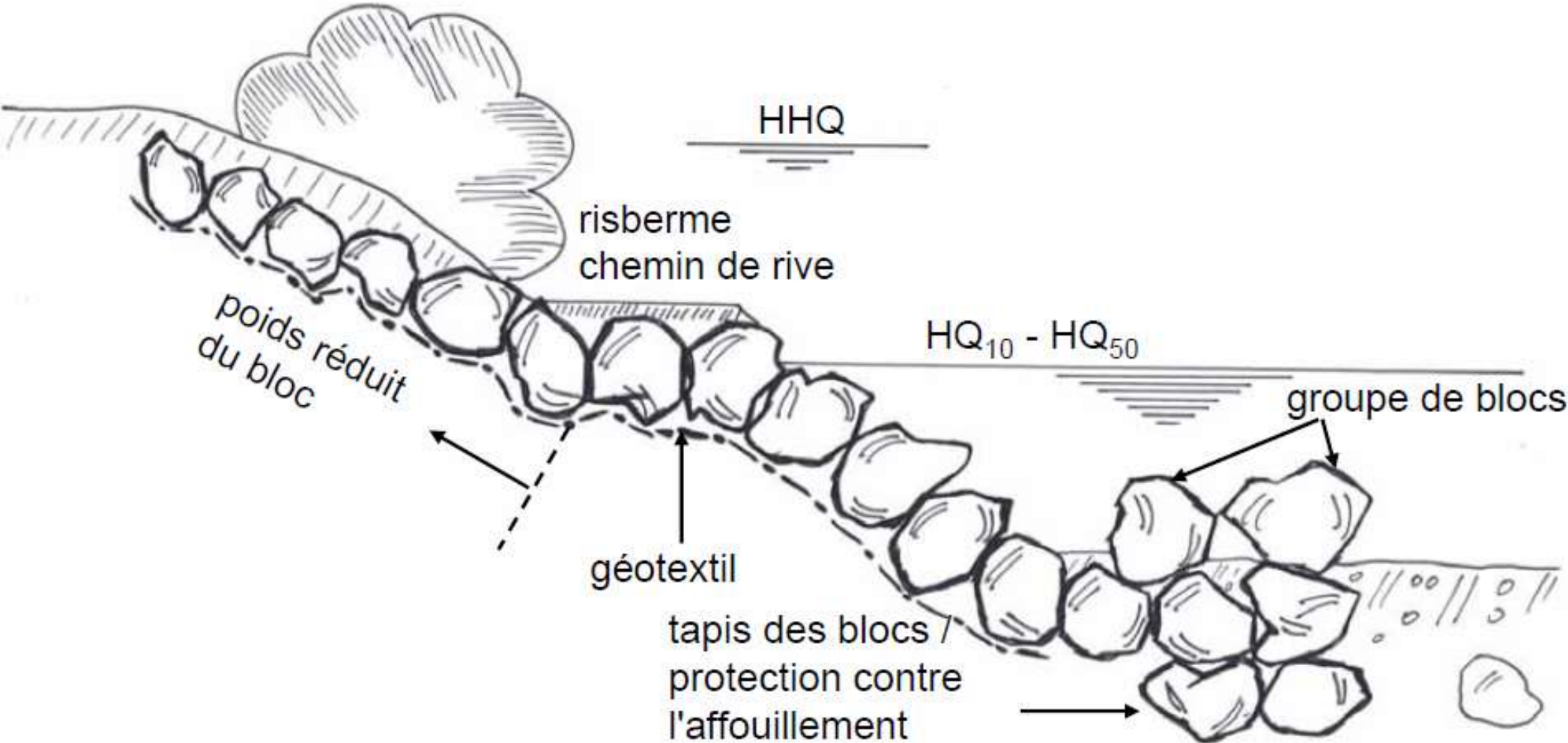
## Enrochement avec une seule couche



# Enrochement en deux couches



# Enrochement avec risberme



## Filtres

Les filtres sont utilisés sous un enrochement pour permettre à l'eau de s'écouler facilement de la berge sans entraîner de particules de sol. Les filtres doivent répondre à deux exigences fondamentales: la stabilité et la perméabilité.

Le matériau du filtre doit être suffisamment fin pour empêcher le matériau de base de s'échapper à travers le filtre, mais il doit être plus perméable que le matériau de base.

Il n'y a pas de filtre standard qui peut être utilisé dans tous les cas, voir HEC-11 (Brown et Clyde 1989) pour des directives supplémentaires sur la conception des filtres.

Deux types de filtres sont couramment utilisés: les filtres granulaires (gravier) et les filtres géosynthétiques.

### Filtres granulaires

Une couche ou une couverture de gravier bien nivelé devrait être placée au-dessus du remblai ou de la berge avant la mise en place de l'enrochement. Les dimensions du gravier dans la couverture filtrante doivent aller de 5 mm à 76 voir 89 mm selon la gradation de l'enrochement. L'épaisseur du filtre peut varier en fonction de l'épaisseur de l'enrochement, mais ne doit pas être inférieure à 152 à 228 mm .

Les filtres qui font la moitié de l'épaisseur de l'enrochement sont tout à fait satisfaisants. Les spécifications suggérées pour la gradation sont les suivantes:

$$(1) \frac{D_{50} \text{ (Filter)}}{D_{50} \text{ (Base)}} < 40$$

$$(2) 5 < \frac{D_{15} \text{ (Filter)}}{D_{15} \text{ (Base)}} < 40$$

$$(3) \frac{D_{15} \text{ (Filter)}}{D_{85} \text{ (Base)}} < 5$$

Si le matériau de base est un sol cohésif à grain fin, tel que l'argile, ces exigences ne sont pas applicables, et le critère de stabilité est que la taille  $D_{15}$  du filtre ne peut pas dépasser 0,4 mm.

Lorsque le matériau de base est très fin, le matériau de filtre requis peut également être assez fin, et plus d'une couche de filtre (un filtre gradué) peut être nécessaire. Dans un tel cas, chaque couche doit satisfaire aux exigences de stabilité et de perméabilité par rapport à la couche sous-jacente.

Si le filtre est conçu pour se protéger contre l'écoulement ascendant de l'eau, le filtre gradué est construit de manière à ce que chaque couche soit plus grossière que celle qui est en dessous (un filtre "inversé" ou "inversé").

La conception de filtre suivante est tirée de Anderson et al. (1968). Les propriétés du matériau de base et de l'enrochement sont indiquées au tableau 6.5. Déterminez si un filtre est nécessaire.

Tableau. Tailles de matériaux.	
Matériau de base (sable)	Enrochements (Rock)
$D_{85} = 1.5 \text{ mm}$	$D_{85} = 400 \text{ mm}$
$D_{50} = 0.5 \text{ mm}$	$D_{50} = 200 \text{ mm}$
$D_{15} = 0.17 \text{ mm}$	$D_{15} = 100 \text{ mm}$

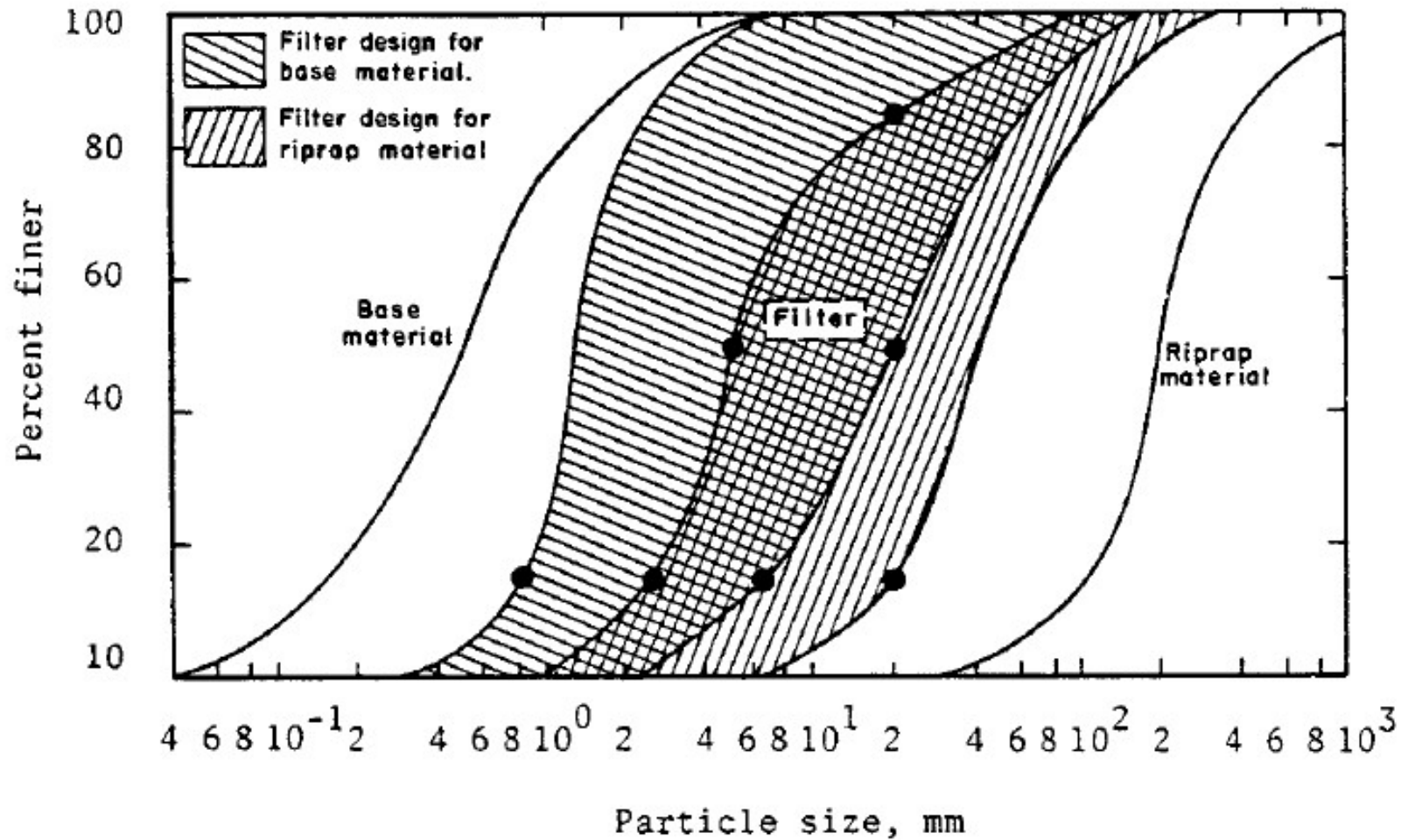


Figure 6.35. Granulometri des filtres pour le problème precedent (d'après Anderson et al., 1968).



## Filtres géosynthétiques.

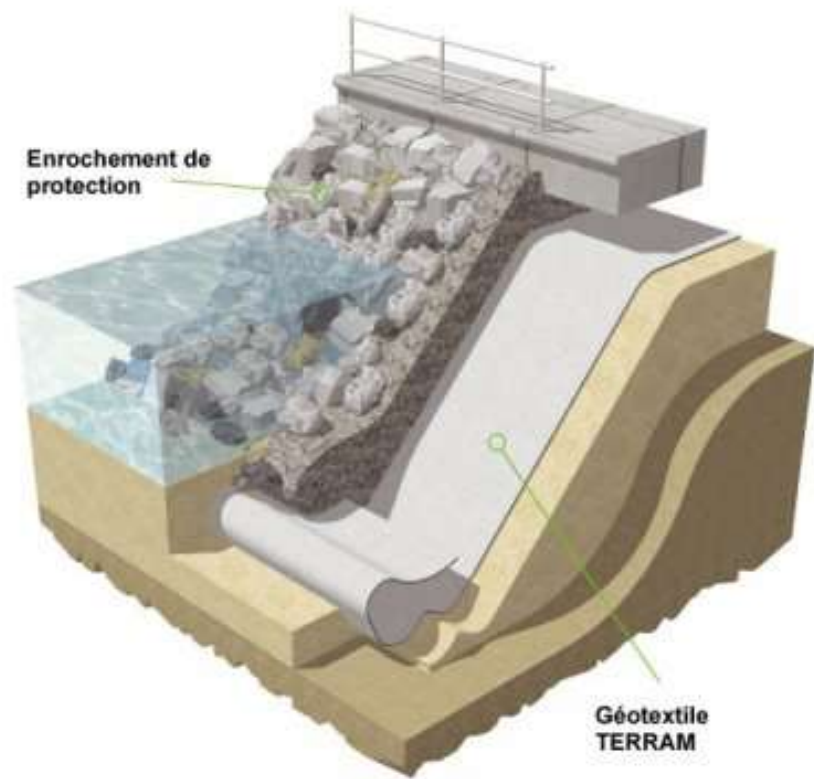
Les matériaux géosynthétiques sont également utilisés comme filtres, remplaçant un composant d'un filtre gradué. De nombreux géotextiles sont sur le marché, avec une grande variation dans la taille et le nombre d'ouvertures et dans la force et la durabilité. Les géotextiles qui fournissent des zones d'ouverture de 25 à 30 pour cent sont souhaitables pour minimiser la possibilité de colmatage et pour réduire la perte de charge.

Lorsque des géotextiles sont utilisés, il faut veiller à ne pas percer le matériau pendant construction. Si le tissu filtrant est placé sur le matériau de base, le gravier peut parfois être placé directement sur le tissu, éliminant ainsi le besoin de sable filtrant.

Si les matériaux de pavage ou la pierre sont déversés dessus, cependant, il est souhaitable de placer une couverture protectrice de sable ou de gravier sur le filtre, ou de prendre soin de placer la roche, de sorte que le tissu de filtre ne soit pas perforé.

Des pierres pesant jusqu'à 1 360 kg ont été placées sur des filtres synthétiques sans dommages apparents. Si un revêtement de protection n'est pas utilisé, la taille et la chute de la roche doivent être délimitées.

Des précautions sont également nécessaires pour assembler les sections adjacentes du tissu filtrant avec des coutures superposées et soudées.



## AUTRES TECHNIQUE DE PROTECTION DES BERGES

Il existe de nombreuses méthodes autres que l'enrochement qui peuvent être utilisées pour la protection des berges, notamment: la végétation, les matelas, les paniers et les blocs.

### **Bioingénierie (Génie végétal) pour le contrôle de l'érosion**

La végétation est probablement la méthode la plus naturelle pour protéger les berges car elle est relativement facile à établir et à entretenir, visuellement attrayante et plus désirable sur le plan environnemental.

Au-dessous de la ligne de flottaison d'un cours d'eau, la végétation peut efficacement protéger une banque de deux façons.

**Premièrement**, le système racinaire aide à maintenir le sol uni et augmente la stabilité globale de la berge en formant un réseau de liaison.

**Deuxièmement**, les tiges exposées, les tiges, les branches et le feuillage fournissent une résistance à l'écoulement, provoquant une perte d'énergie du flux en déformant les plantes plutôt qu'en enlevant les particules du sol.

Au-dessus de la ligne de flottaison, la végétation empêche l'érosion de surface en absorbant l'impact de la chute des gouttes de pluie et en réduisant la vitesse du courant de drainage sur les berges et le ruissellement des pluies. En outre, la végétation prend l'eau du sol fournissant une capacité supplémentaire pour l'infiltration et peut améliorer la stabilité de la berge par le prélèvement d'eau.

La végétation est généralement divisée en deux grandes catégories: les graminéesles « **herbes**, **céréales** et **bambous** » et les plantes ligneuses (arbres et arbustes).

- Les herbes sont moins coûteuses à planter sur une berge érodée au-dessus du pied et nécessitent une période plus courte de temps pour s'établir.
- Les plantes ligneuses offrent une meilleure protection contre l'érosion en raison de leurs systèmes racinaires plus étendus;

Cependant, dans certaines conditions, le poids de la plante compensera l'avantage du système racinaire. Sur les berges très élevées, les systèmes racinaires des arbres ne pénètrent pas toujours jusqu'au bout de la berge. Si l'orteil s'érode, le poids de l'arbre et sa masse racinaire peuvent provoquer une défaillance de la banque.

L'herbe peut être planté par semis à la main, ou par diffusion mécanique de paillis, comprenant des semences, des engrais et d'autres mélanges organiques.

Plusieurs fabricants commerciaux proposent des tapis de contrôle de l'érosion qui maintiendront la semence et le sol en place jusqu'à ce qu'une nouvelle végétation puisse s'établir.

Le tapis est généralement installé à la main et fixé à la rive où les plantations ont été faites pour empêcher l'érosion, alors une clôture devrait être placée le long du sommet de la banque. Si le bétail doit avoir accès au cours d'eau pour l'arrosage ou le passage, les barrières doivent être placées dans la clôture à des endroits où le bétail fera le moins de dégâts à la berge plantée; De plus, les passages à niveau devraient être clôturés.

## Exemple

### Couverture tridimensionnelle armée remplie de fibres de polypropylène

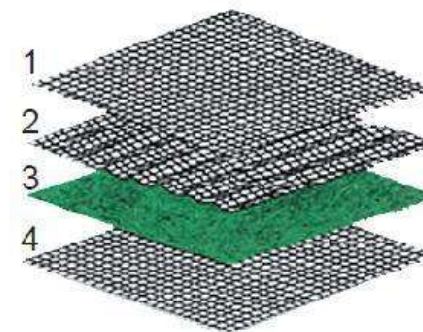
La protection anti-érosive par excellence !  
Remplace jusqu'à 91 cm d'enrochement

Ce tapis tridimensionnel est fabriqué à partir d'une association de 3 grilles synthétiques dont une centrale ondulée et d'un remplissage de fibres de polypropylène vertes.

La présence des fibres grâce à leur pourcentage de couverture très élevé ( $\geq 90\%$ ) permet un contrôle immédiat et très efficace de l'érosion. Ces fibres vertes créent un micro climat idéal pour une germination plus rapide et plus sûre. Le NAG P550 peut être installé toute l'année et ne nécessite pas d'être recouvert de terre. Insensible aux crues ou orages, c'est l'outil idéal de contrôle immédiat de l'érosion et d'aide à l'installation de la végétation. Le NAG P550 remédie à tous les inconvénients des géomats (géogrille tridimensionnelle) synthétiques traditionnels qui eux nécessitent d'être recouverts de terre.

#### Utilisations :

Protection permanente contre l'érosion de talus très raides, berges et canaux de drainage à fort débit, cunettes.



## Matelas de Roche et fil

Lorsque des tailles d'enrochement adéquates ne sont pas disponibles, des roches de tailles de galets peuvent être placées dans des treillis en treillis métallique faits de clôtures galvanisées et placés le long de la rive formant un matelas. Les unités de fil individuelles sont appelées paniers si l'épaisseur est supérieure à 300 mm. Le terme matelas implique une épaisseur ne dépassant pas 300 mm.

La protection des pieds est offerte en étendant les matelas sur le lit du canal, ou en encastrant le matelas à une profondeur d'affouillement prédéterminée. Il est à noter que lorsque des matelas de pierre et de fil sont utilisés dans des cours d'eau transportant des cailloux et des roches, les fils du panier peuvent être coupés par abrasion plutôt rapidement, ce qui détruira la protection prévue à la base de la berge. La corrosion du treillis métallique et le vandalisme peuvent également poser problème



## Gabions

Les gabions sont des boîtes à fil rectangulaires (ou paniers) remplies de pierres de taille relativement petite, généralement de moins de 200 mm de diamètre. Lorsque les vitesses d'écoulement sont telles que la petite pierre ne serait pas stable si elle était utilisée dans une couverture en enrochement, les boîtes en fil métallique offrent une retenue efficace.

La limitation de la vitesse maximale recommandée pour l'utilisation de gabions varie de 2,4 à 4,6 m / s . Les gabions sont utilisés principalement pour les structures de type revêtement, mais ils ont également été utilisés pour les digues et les seuils. Les gabions agissent comme une grande masse poreuse lourde ayant une certaine flexibilité. Une couverture filtrante ou un tissu filtrant synthétique est utilisé, si nécessaire, pour empêcher le lessivage du matériau de base et la détérioration des paniers.



## Sacs

Les sacs en toile de jute remplis de terre ou de mélanges sable-ciment ont longtemps été utilisés pour les travaux d'urgence le long des digues et des berges pendant les crues (Au cours des dernières années, des sacs fabriqués industriellement (toile de jute, papier, plastique, etc.) ont été utilisés pour protéger les berges dans les zones où l'enrochement de taille et de qualité appropriées n'est pas disponible à un coût raisonnable.

Bien que la plupart des types de sacs soient facilement endommagés et finissent par se détériorer, ces sacs remplis de mélanges sable-ciment peuvent assurer une protection à long terme si le mélange est correctement installé.

La construction de revêtement de sacs en sable-ciment n'est pas économiquement compétitive dans les zones où une bonne pierre est disponible.

Cependant, si l'enrochement de qualité doit être transporté sur de longues distances, ce type de revêtement de sac peut souvent être placé sur une berge d'érosion à un coût moindre que l'enrochement.

## Autre dispositifs

- Systèmes de blocs de béton articulés (ACB)
- Pneus usagés
- Ciment de sol