

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

H. Bouchelkia  
F. BELARBI

## 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.

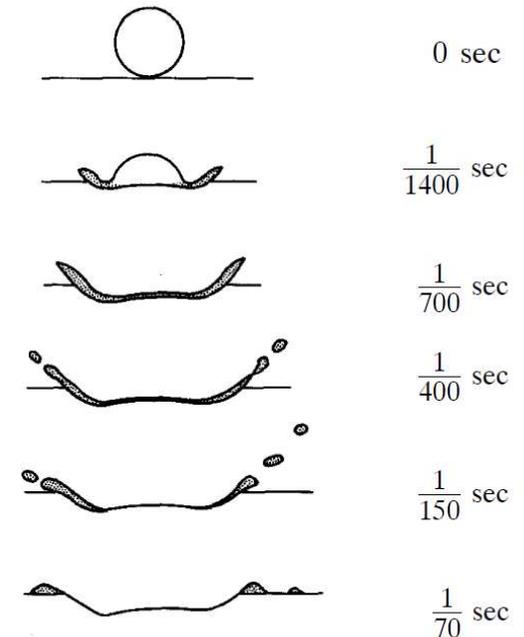
### L'impact des gouttes de pluie

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.*



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



*Ravinement sur des parcelles laissées nues l'hiver.*



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

## 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.

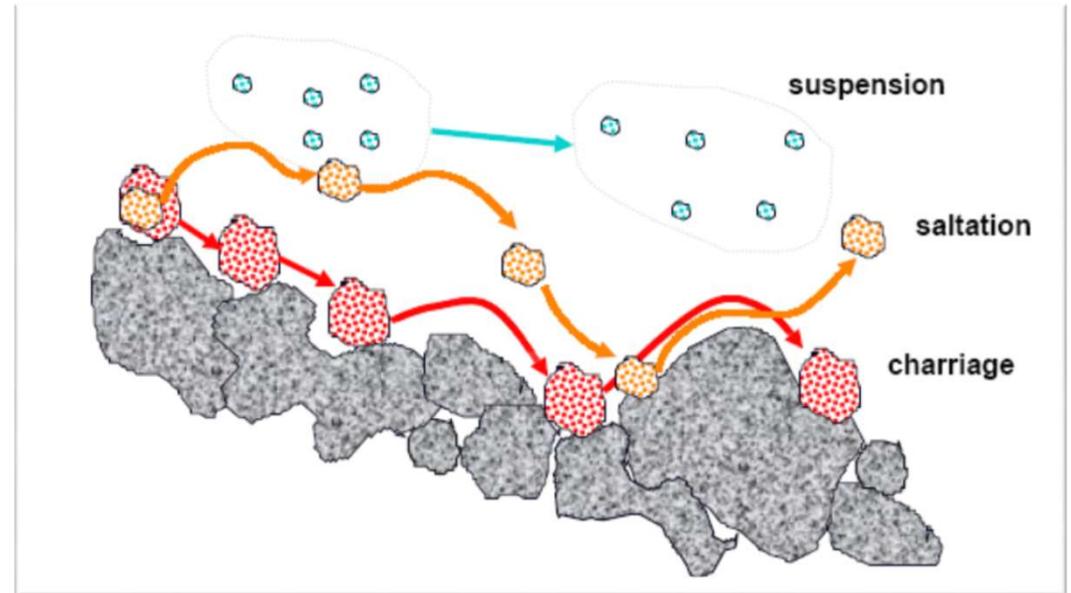


Figure I.2.1 : mode de transport des sédiments

## **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

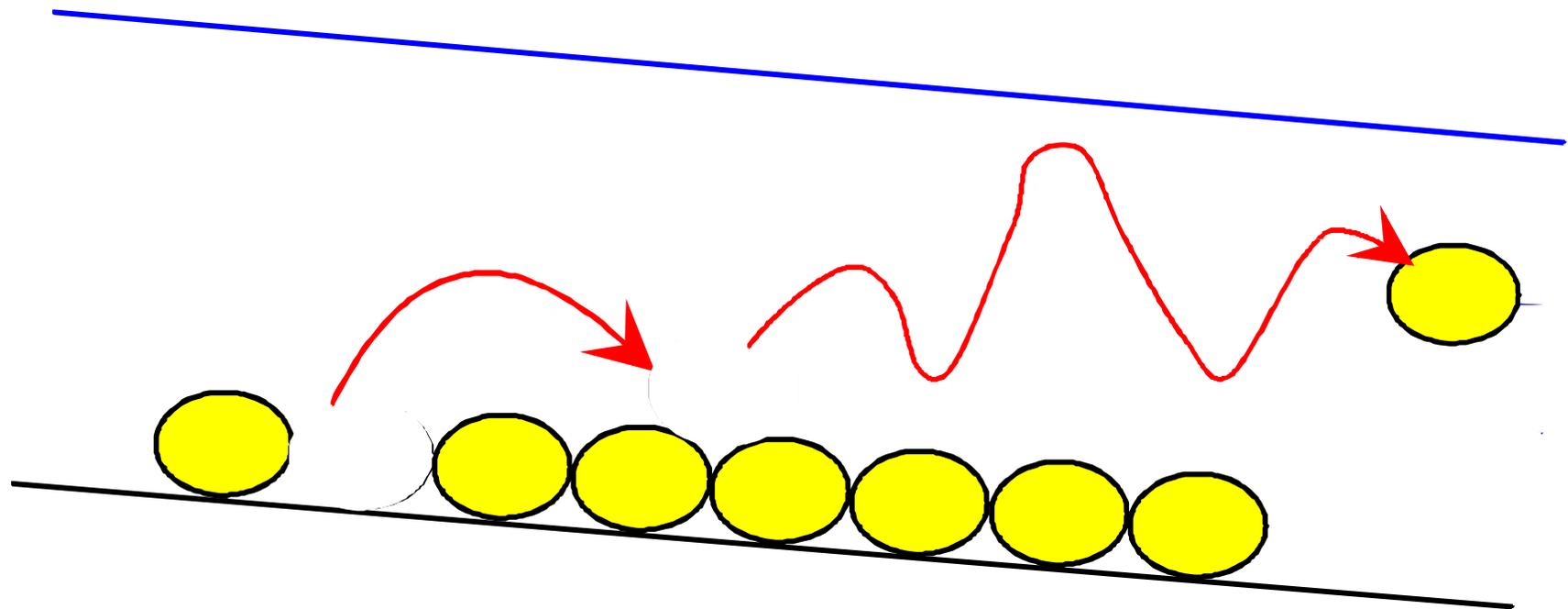
Dans un canal vitré uniforme, plaçons sur le fond une épaisseur de grains de graviers identiques et faisons ensuite croître la vitesse de l'écoulement. Pour les faibles vitesses, rien ne se passe : les matériaux solides restent au repos.

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 ...*

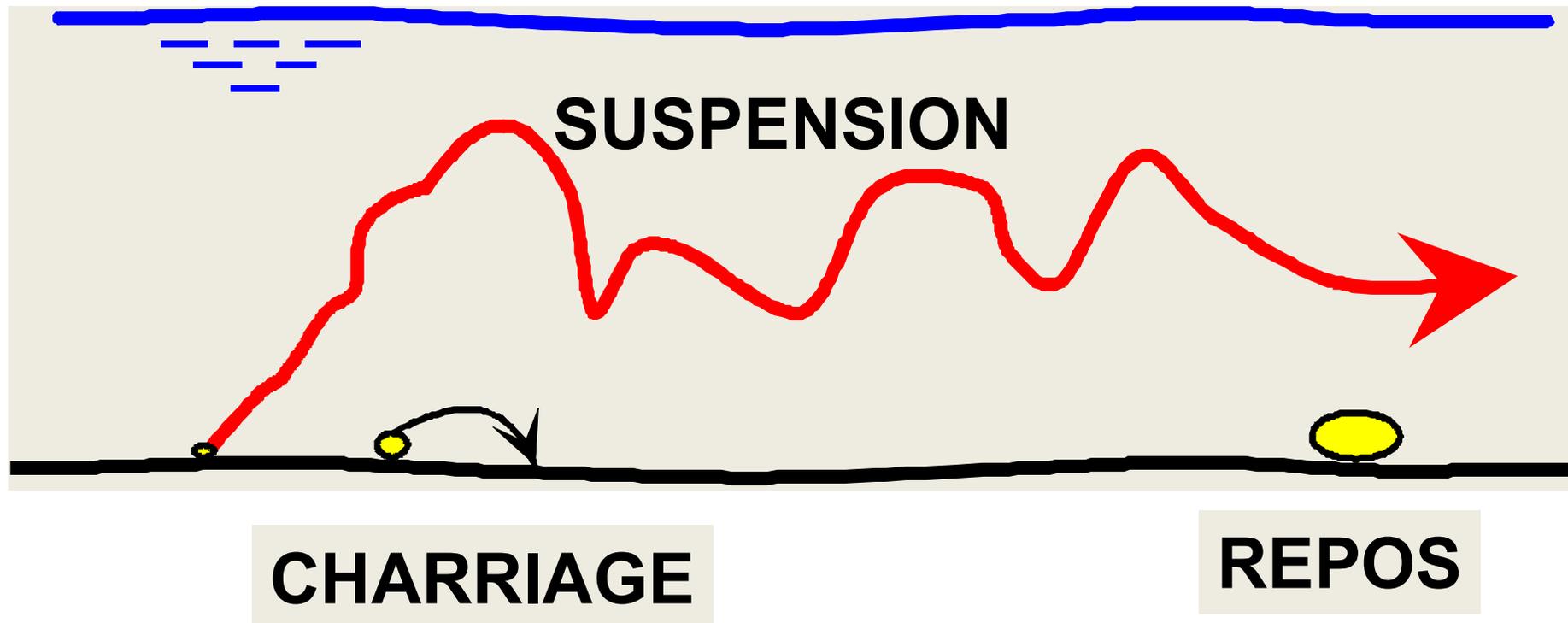


**repos**

**charriage**

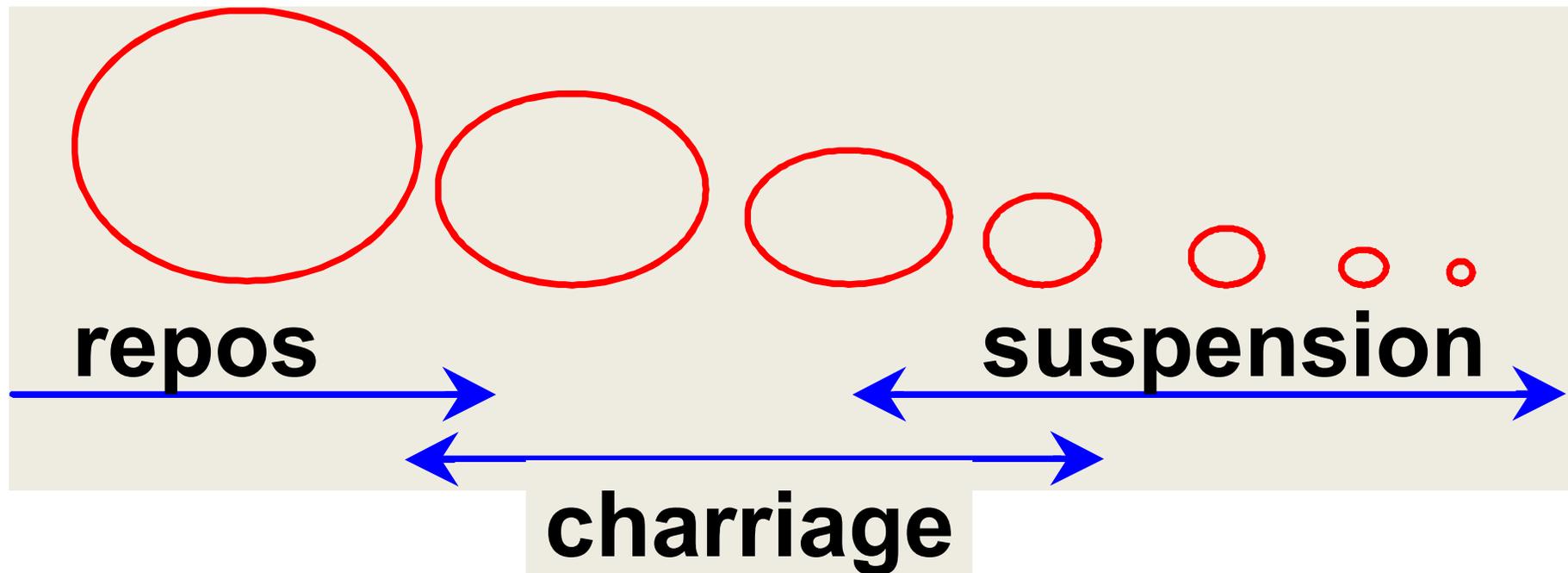
**suspension**

# Cas de matériaux de fond non uniformes



# Rôle de la taille des grains

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

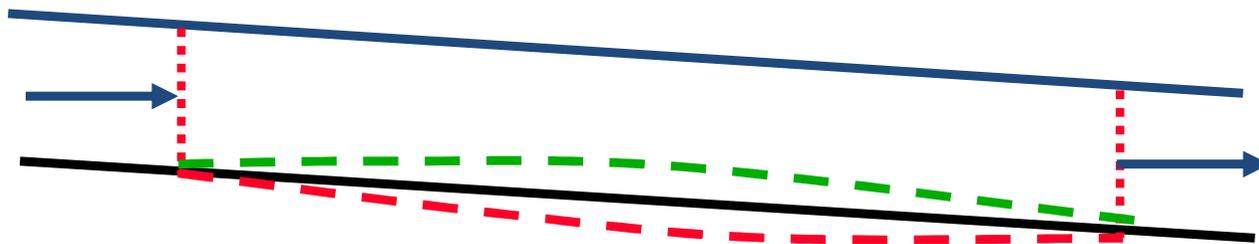


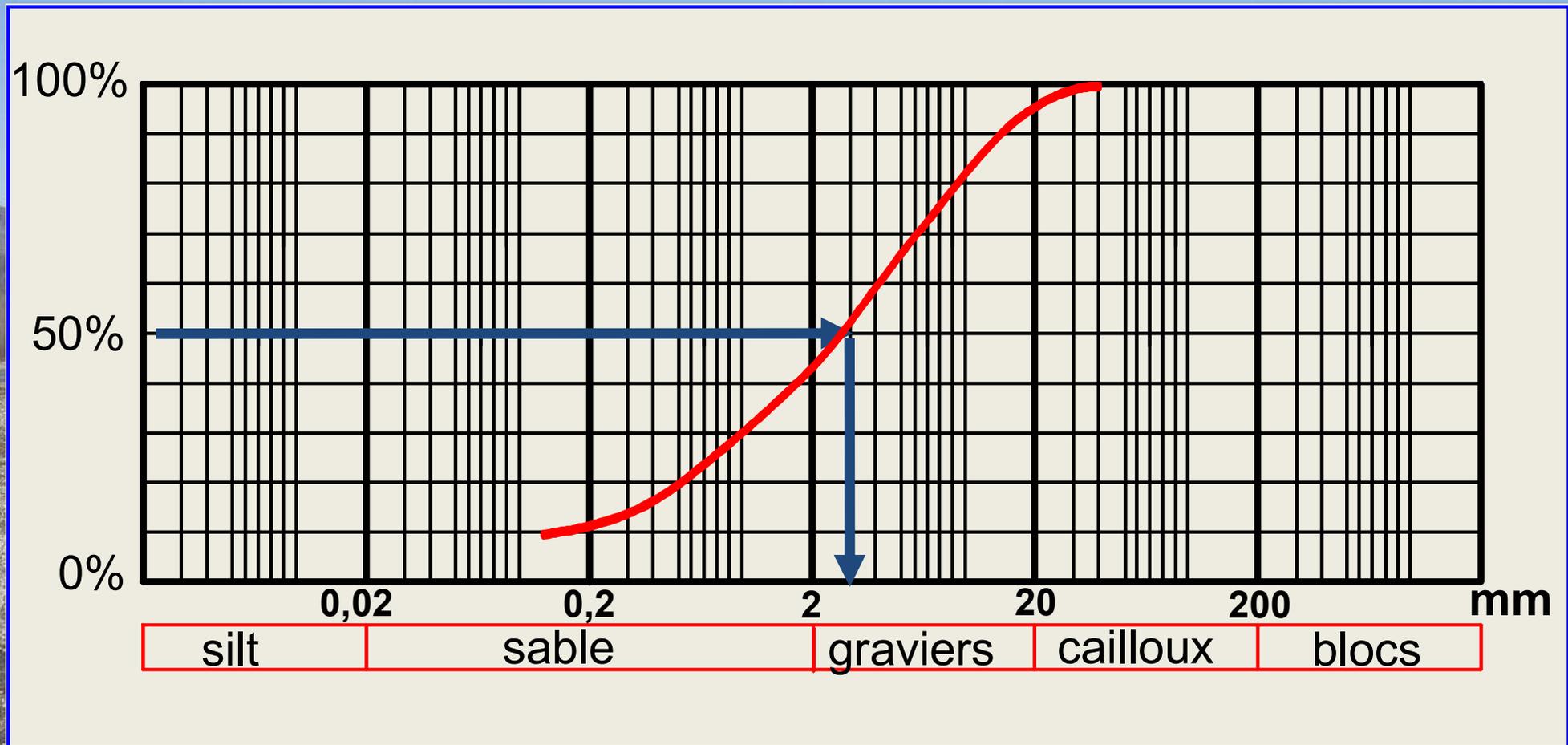
# Saturation en débit solide

$Q_s \text{ sortant} = Q_s \text{ entrant}$  : équilibre

$Q_s \text{ sortant} < Q_s \text{ entrant}$  : dépôt

$Q_s \text{ sortant} > Q_s \text{ entrant}$  : érosion





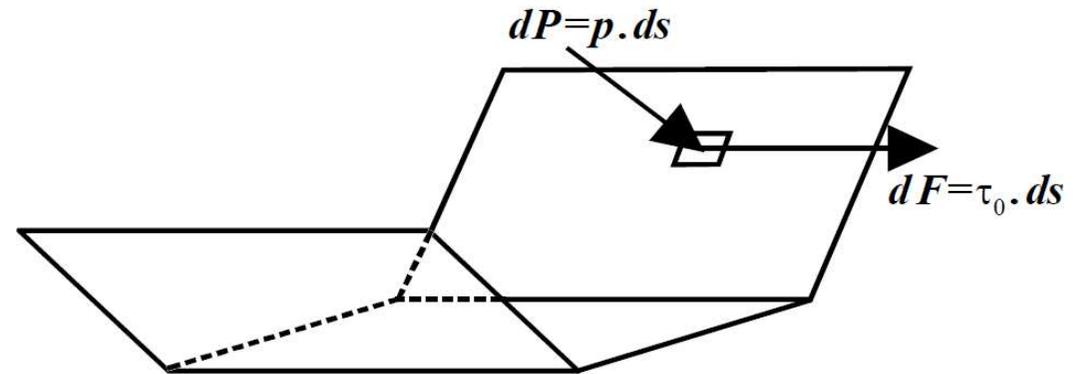
$$d_{50} = 3 \text{ mm}$$

*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 :

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

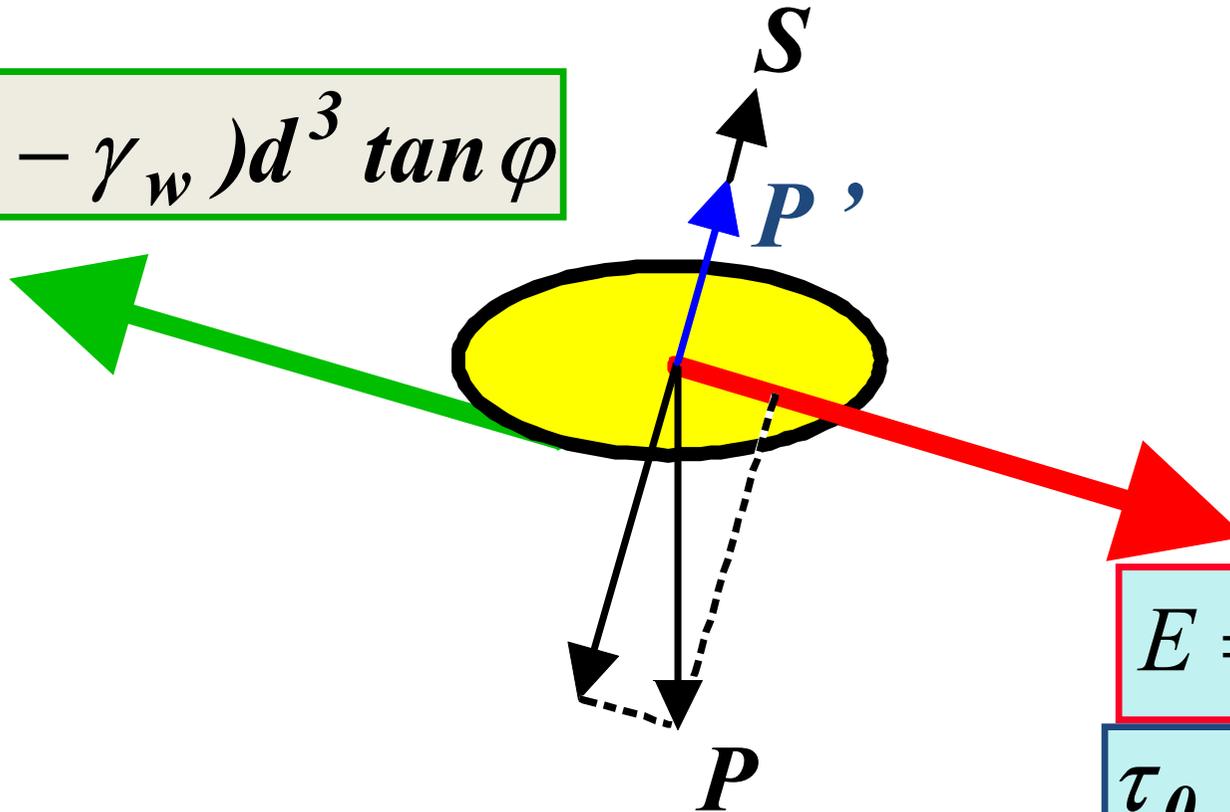
où  $\tan \phi$  est le coefficient de frottement grain sur grain mesuré sous l'eau (les grains sont supposés sans cohésion) ;

- 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

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



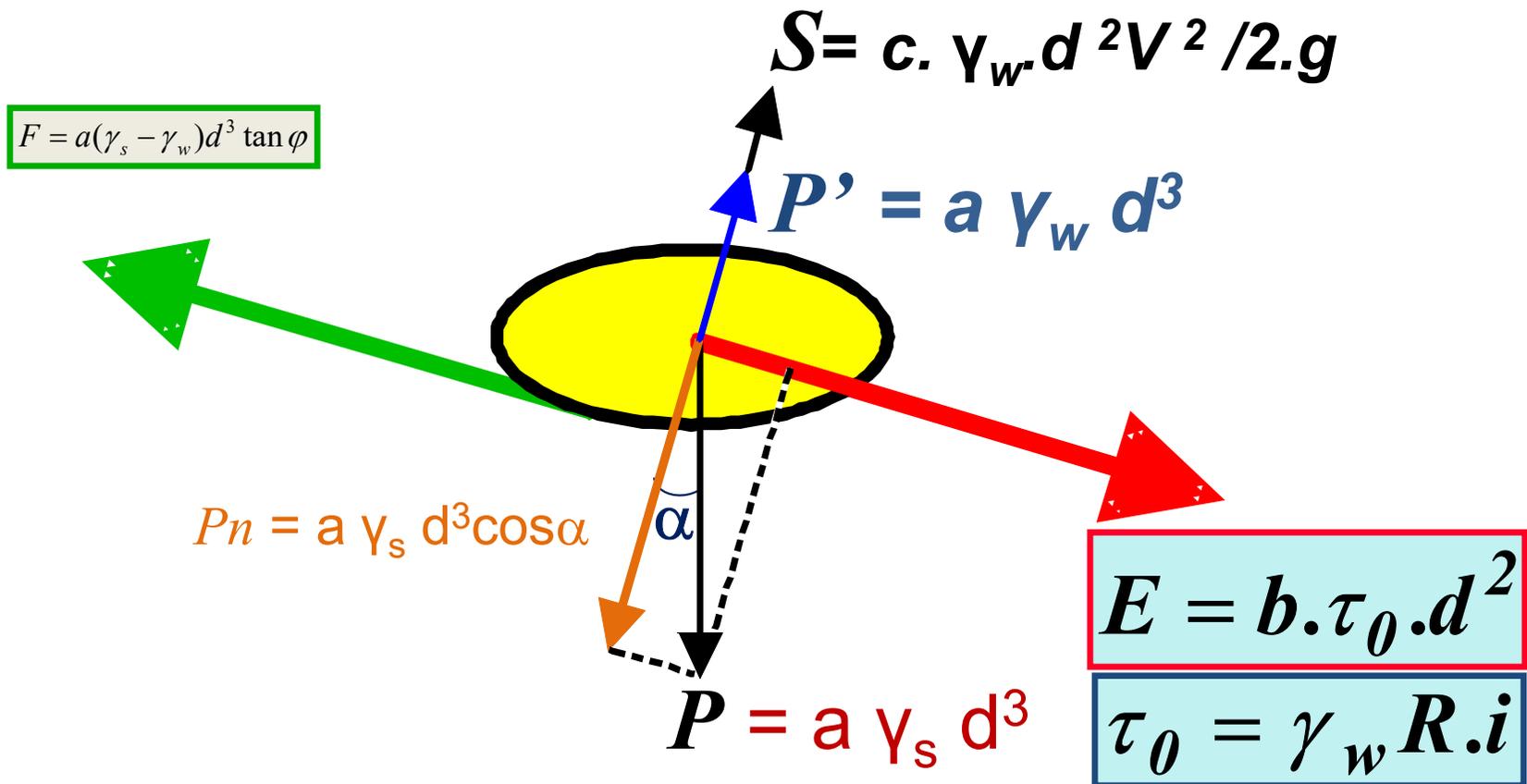
$$E = b.\tau_0.d^2$$

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

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

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

# 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  $t \mathbf{E} = \mathbf{F} - \mathbf{P}_t$ . 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

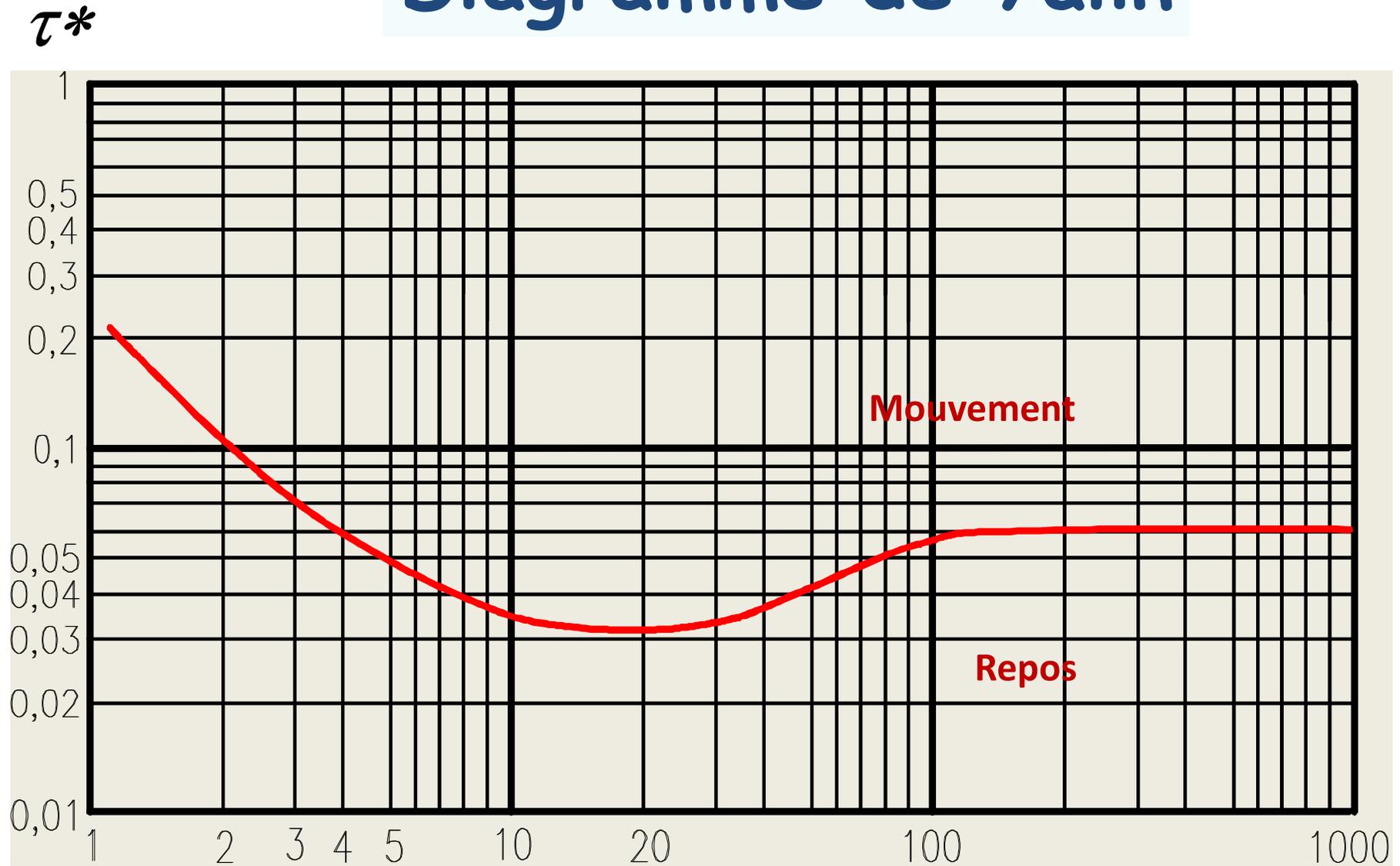
En supposant que  $\frac{\gamma_s}{\gamma_w} = 2,6$ , et en se plaçant à 20°C, la viscosité cinématique vaut

$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$ , 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

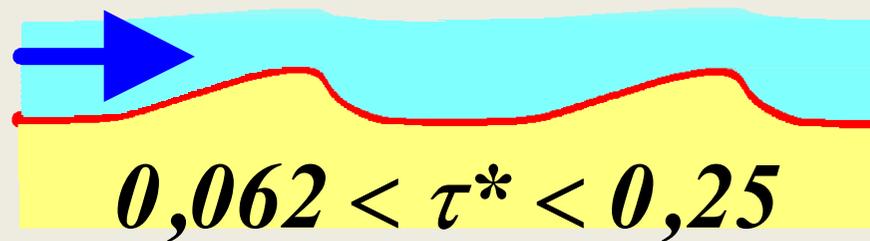
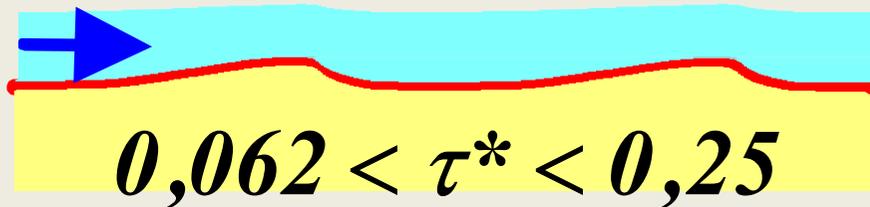
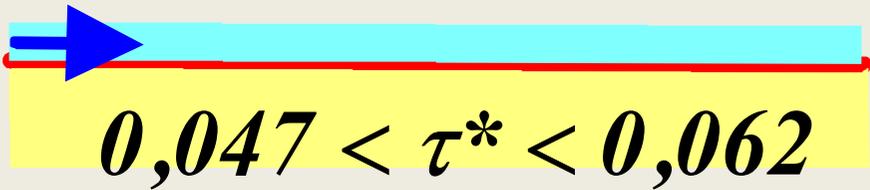
$$\tau^* > 2,5$$

: suspension et fond plat

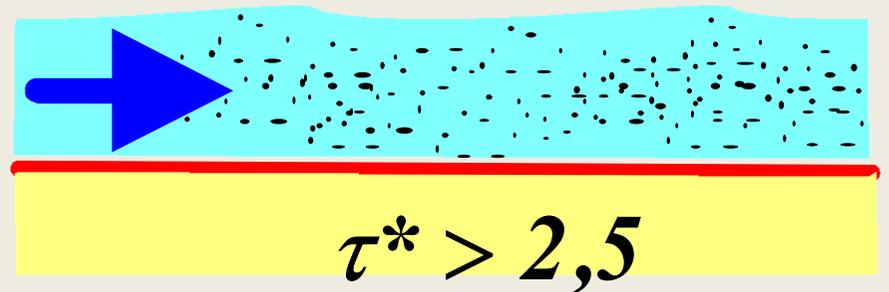
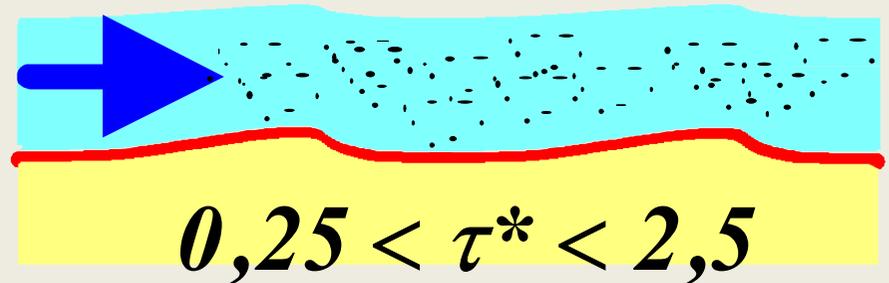
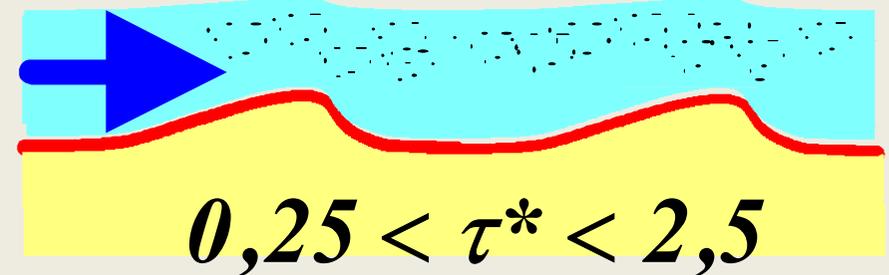
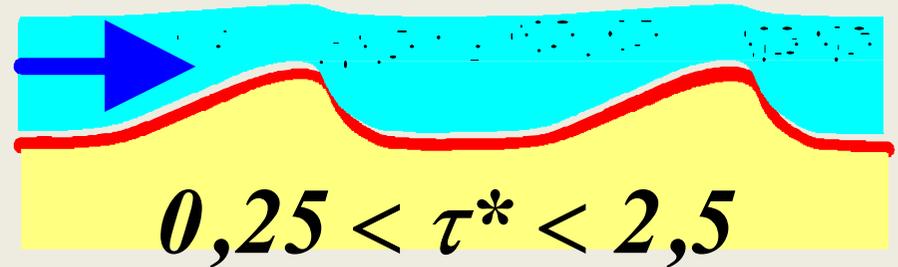
# DUNES

$\tau^* \nearrow$

## 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

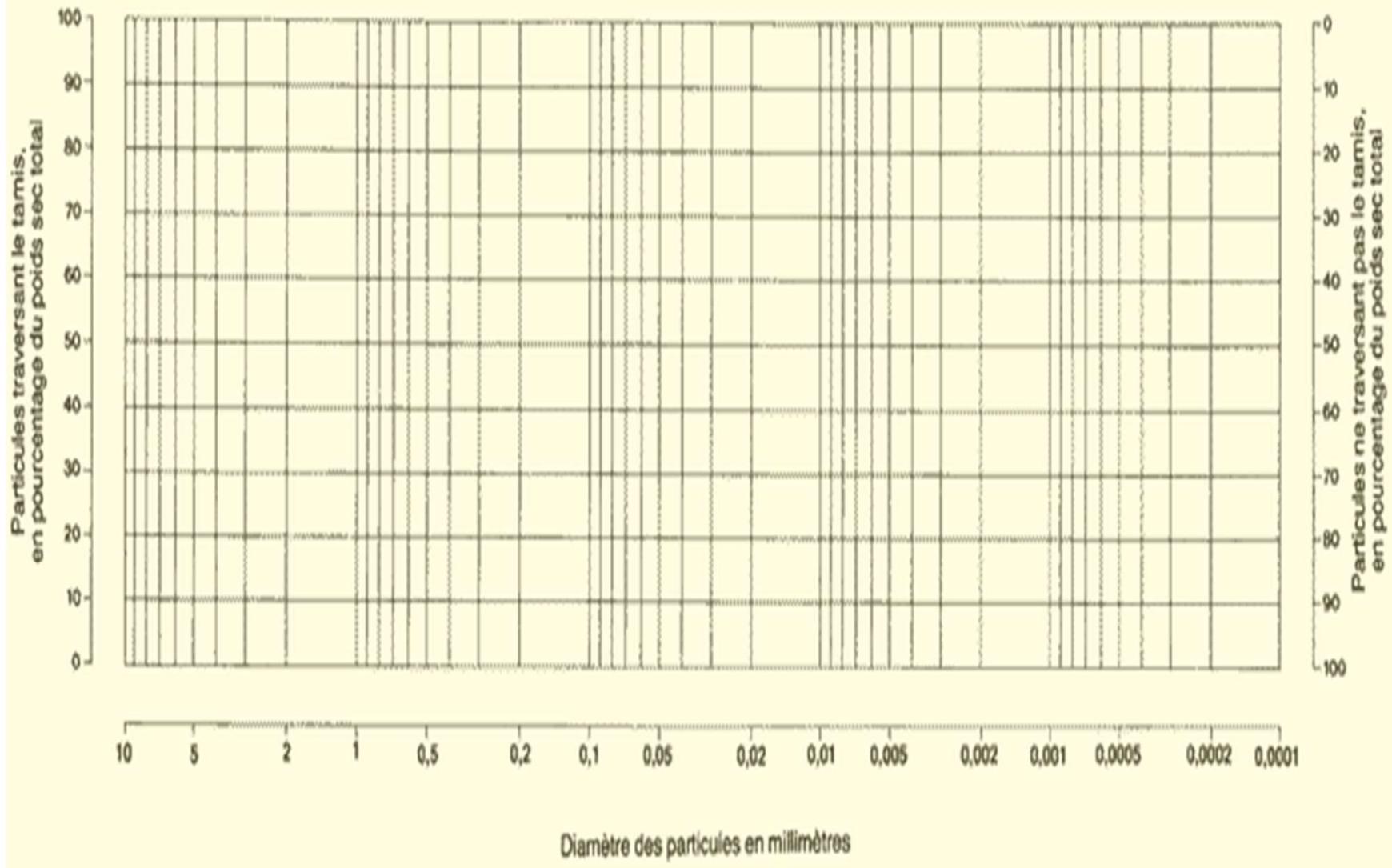
$$\overline{q_s} = 0,010.K^2 .y^{17/6} .i^{5/2} .d^{-1}$$

**vides compris**

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

**sans vides**

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



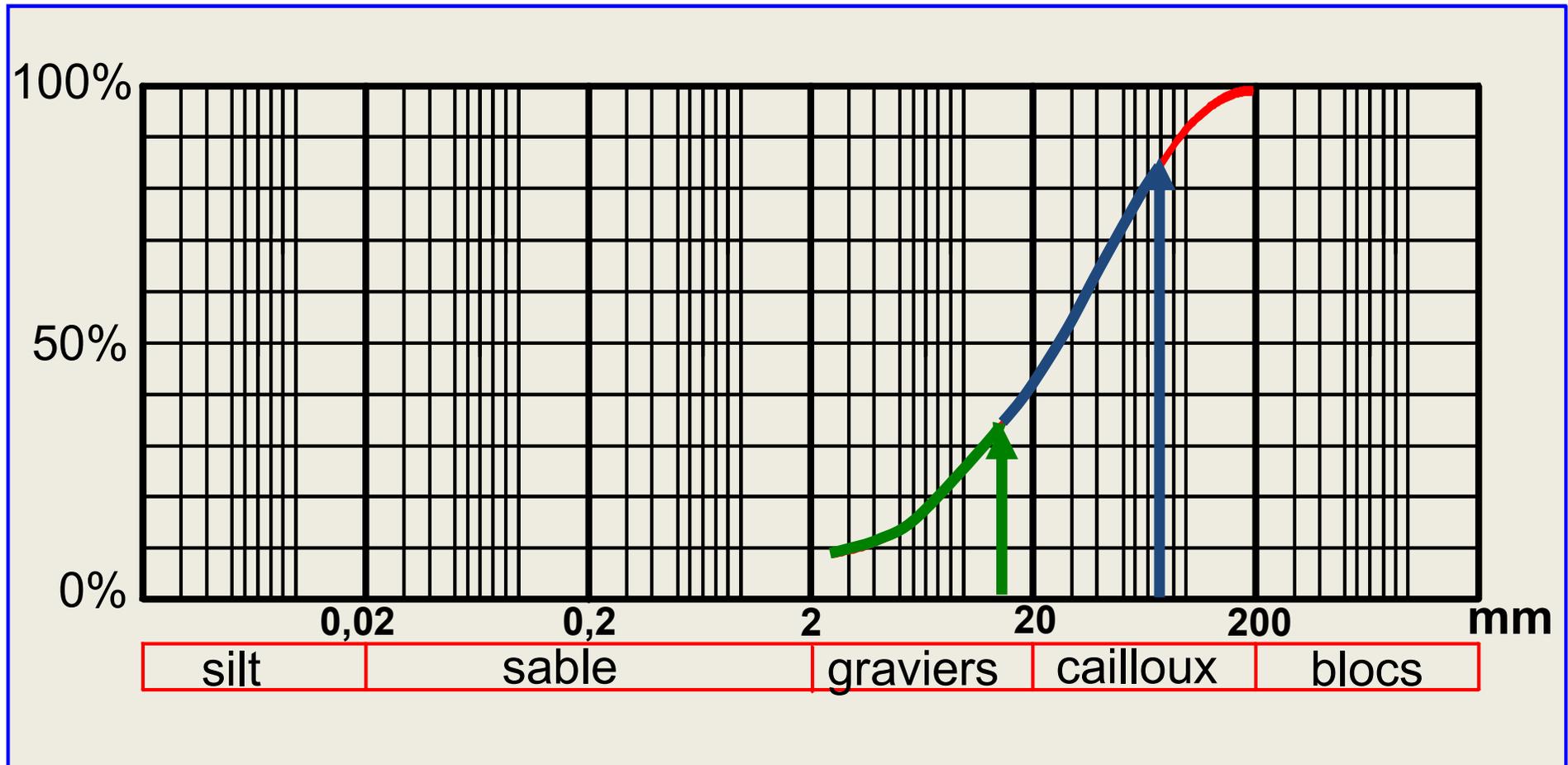
## ***Application 1***

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)**

# III. Différents types/techniques de confortement de berges