



2^{ème} année Master

Hydraulique Urbaine

Ouvrages Hydrauliques

Chapitre1

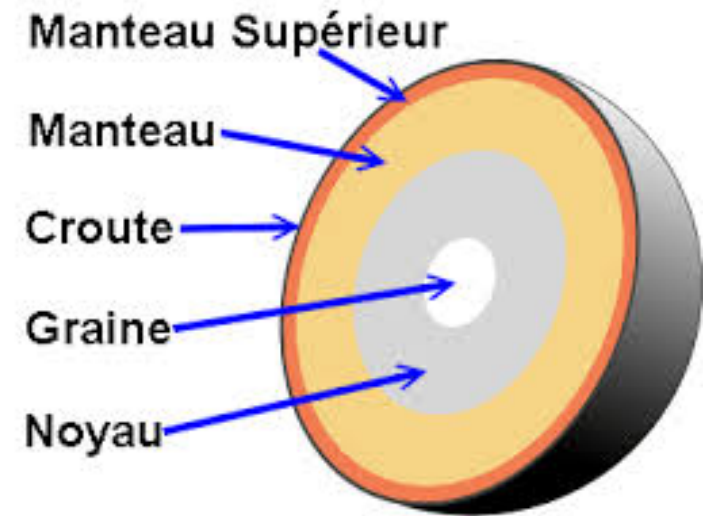
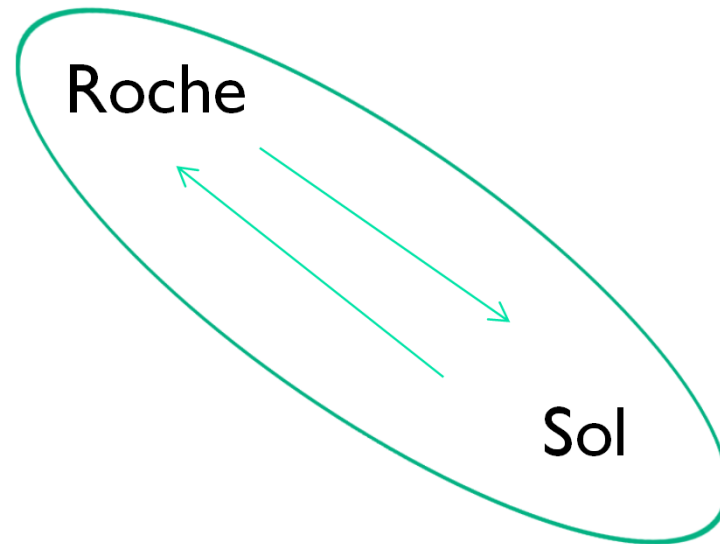
Modes de transport



A.N.GHENIM

Introduction

L' écorce terrestre se compose principalement de roches et de sols



Roche

- un morceau de la croûte terrestre est composé de deux ou plusieurs minéraux.

Il y a **trois** familles de roches.

Les roches ignées



- Formées par le refroidissement de la roche fondue (lave ou magma).

Elles peuvent être:

- formées par le refroidissement du **magma** sous la surface de la Terre

Exemple : Granit

Les roches ignées

- formées par le refroidissement de la **lave** d'un volcan



Exemple : pierre ponce, basalte

Les roches métamorphiques

- formées par la transformation très lente d'autres roches par la chaleur, la pression ou les fluides très chauds.

Roche-mère	Roche métamorphique
Granit	Gneiss
Grès	Quartzite
Calcaire	Marbre
Schiste argileux	Ardoise



Le Gneiss

Les roches sédimentaires

- Formées par le durcissement des sédiments (des petits fragments de roche, comme le gravier, le sable, le limon et l'argile).



Altération des roches – Formation des sols

- L'altération est l'ensemble des mécanismes physiques et chimiques qui transforment la roche-mère en **particules** et libèrent les ions constitutifs des minéraux.

On distingue:



♦ L'ALTERATION PHYSIQUE :

Les principaux processus de l'altération physique sont les suivants:

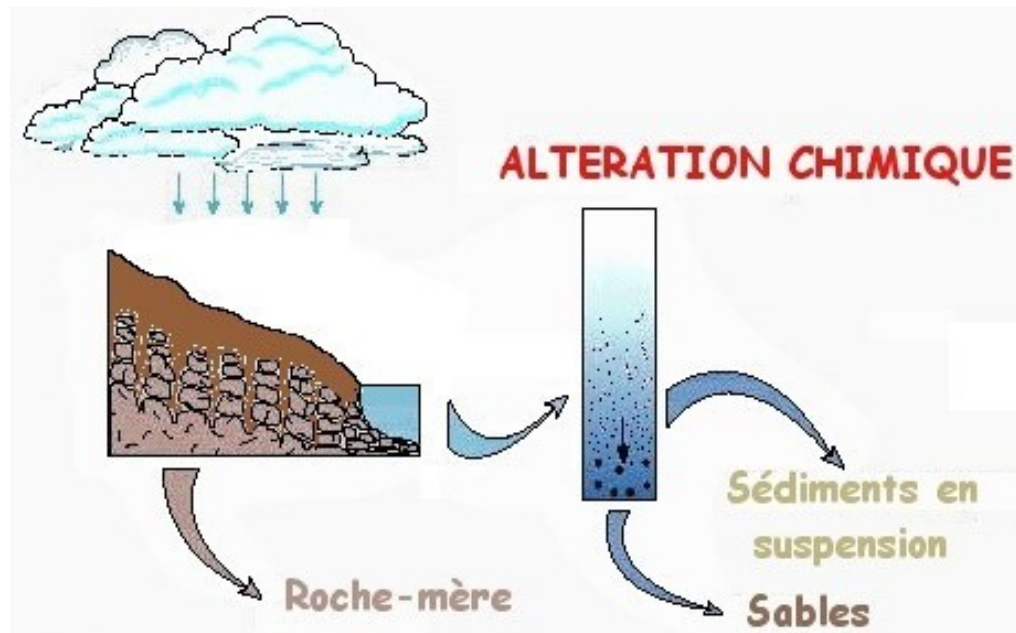
- les alternances de gel-dégel,
- les variations répétées de température
- l'usure mécanique où des grains sont emportés par le vent, l'eau ou la glace.



♦ L'ALTERATION CHIMIQUE :

L'altération chimique des roches se fait en présence d'eau.

elle a lieu essentiellement en climat humide.



♦ L'ALTERATION BIOLOGIQUE :

L'altération biologique est provoquée par l'action chimique de **composés** produits par des **organismes** (plantes, microbes,...)



Phénomène d'érosion des sols

L'érosion correspond à la **mobilisation** des particules de sol issues de l'altération. Ces particules sont transportées par **l'air**, **l'eau** ou la **glace**.



On distingue:

♦ L'EROSION NATURELLE OU GEOLOGIQUE :

Elle se déroule continuellement mais très lentement.
Elle se chiffre en moyenne à 1 à 2 t/ha/an.



♦ L'EROSION ACCELEREE OU ANTHROPIQUE:

Elle est provoquée par l'homme. Elle est de l'ordre de 50 t/ha/an.

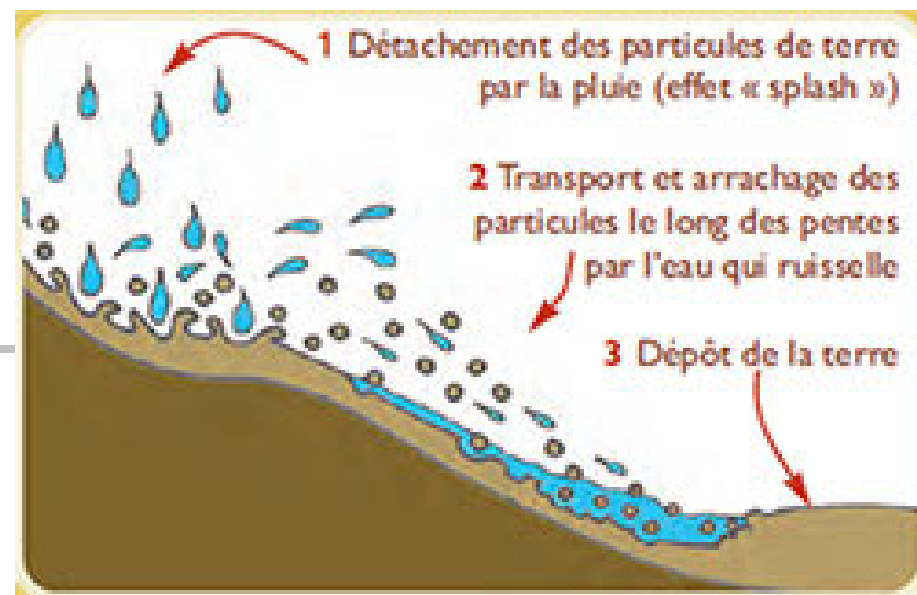
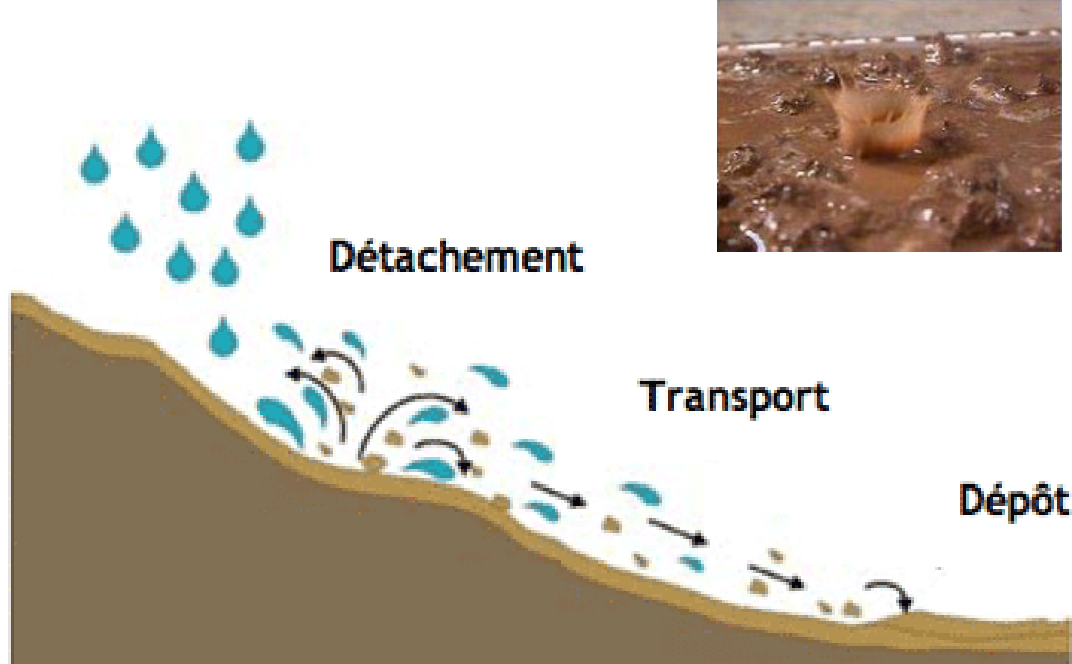




Erosion hydrique



Erosion éolienne





Erosion en nappe



Erosion en rigoles

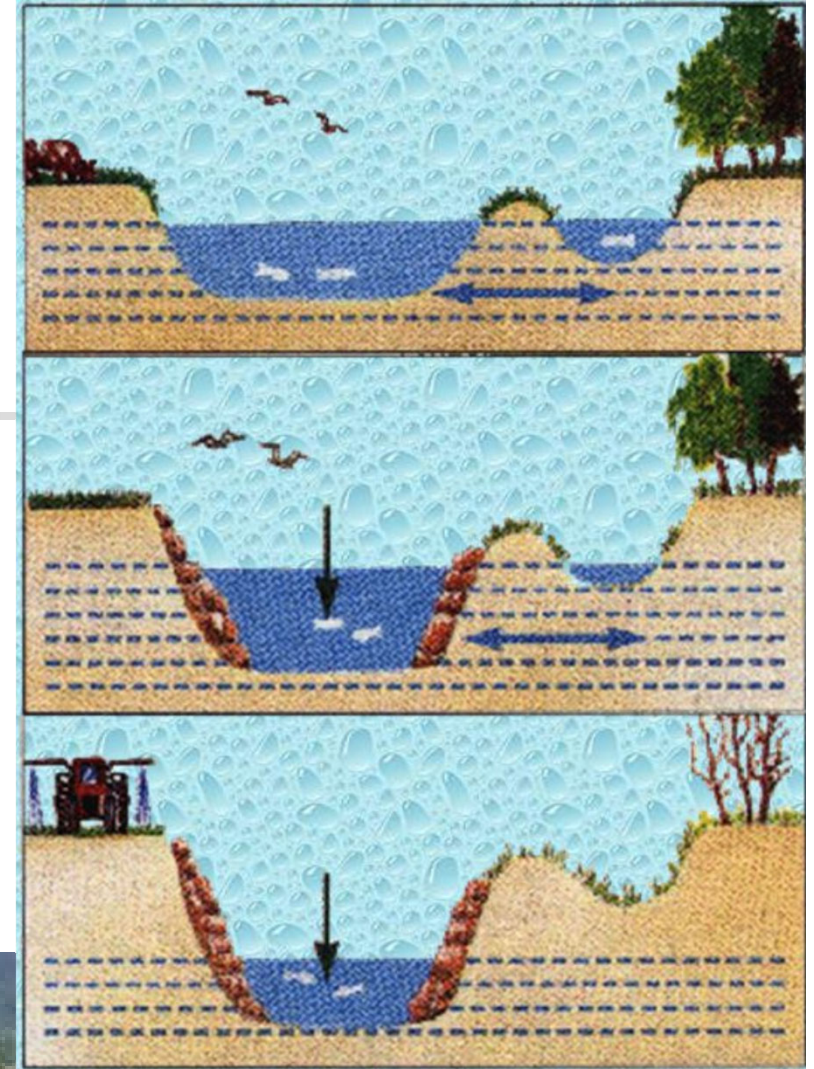


Erosion par ravinement

Erosion des cours d'eau

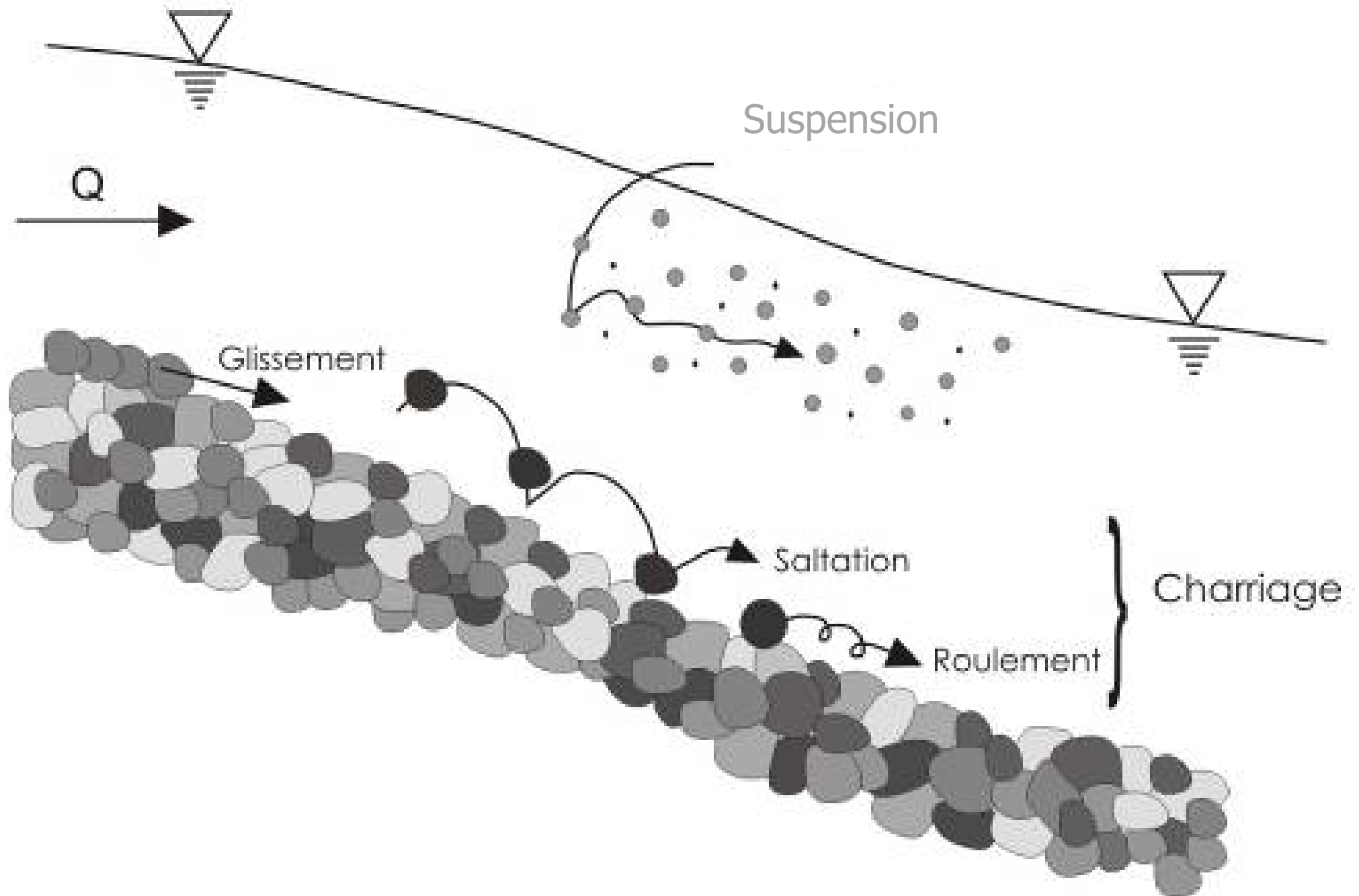


Erosion des berges

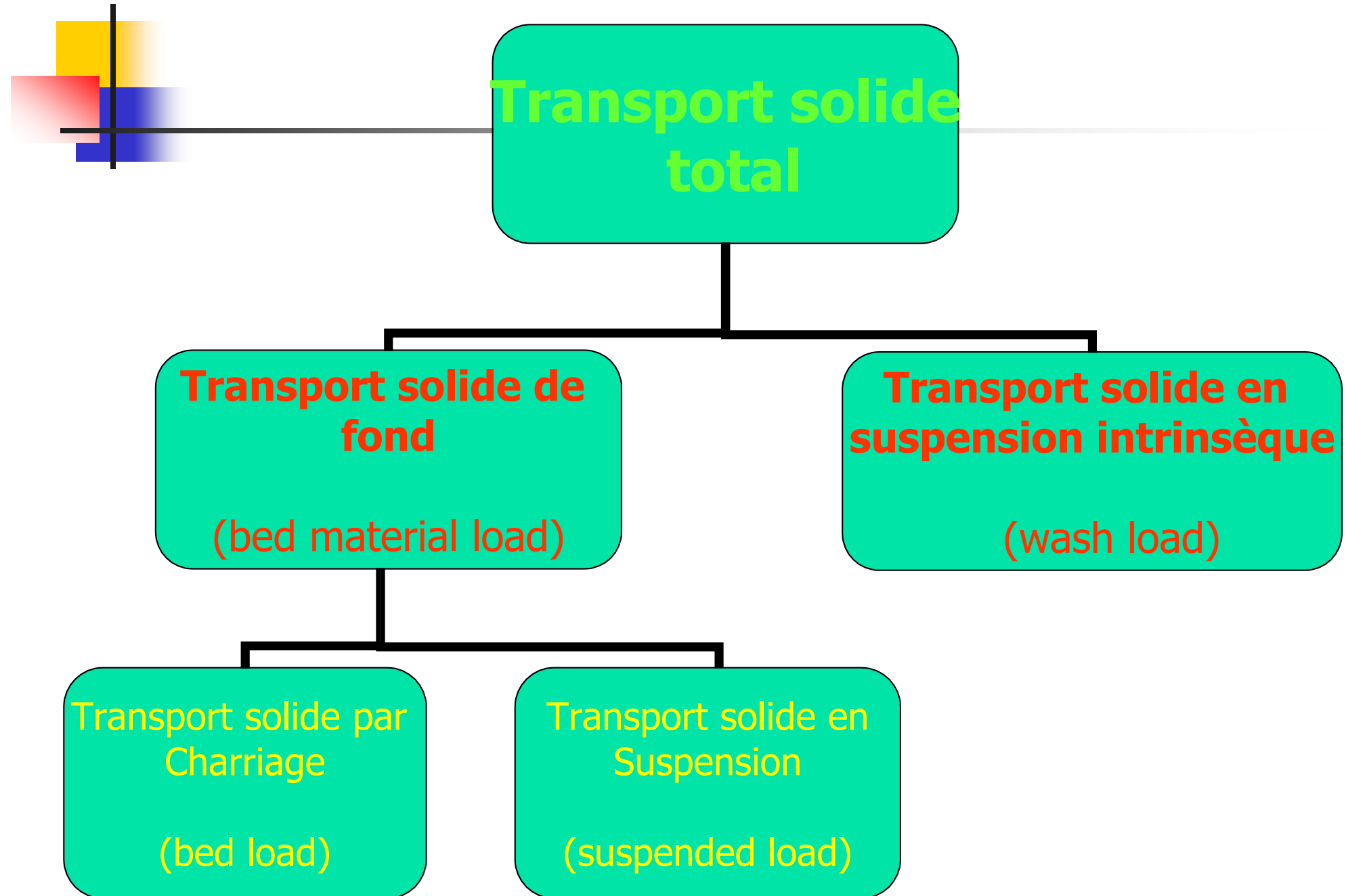


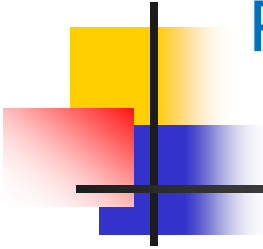
Erosion du lit
du cours d'eau

Transport solide



Modes de transport solide



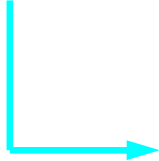


Propriétés réglant le transport solide dans un cours d'eau

1. La compétence : mesurée par le diamètre maximum des débris rocheux que peut transporter le cours d'eau.



Fonction principalement de la vitesse de l'eau



Graphique de Hjulström

2. La capacité : c'est la quantité maximale des matériaux solides que peut transporter en un point et à un instant donné le cours d'eau.

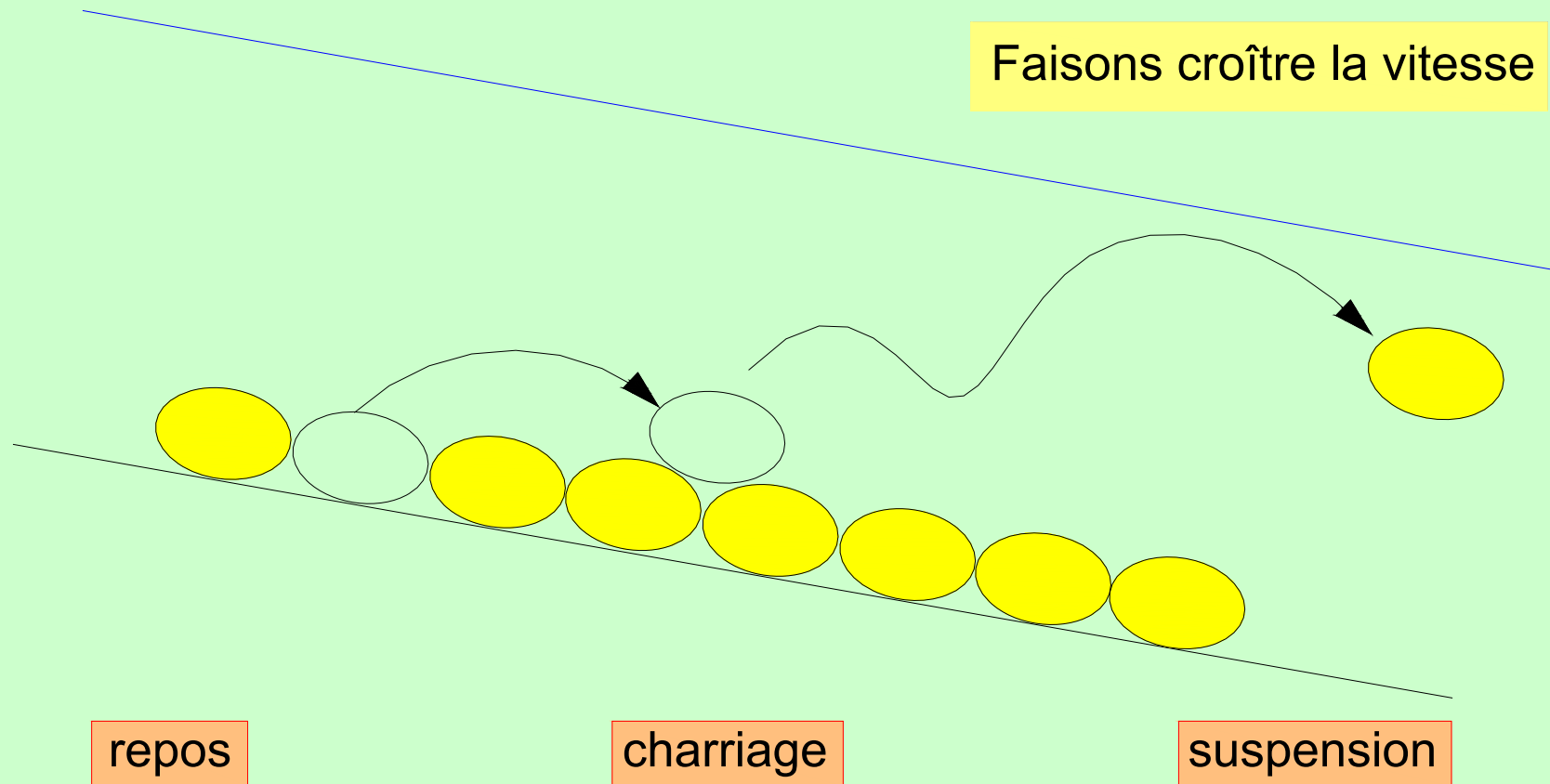


Fonction de la vitesse de l'eau, du débit et des caractéristiques de la section (forme, rugosité,)

Paramètres influençant le mode de transport

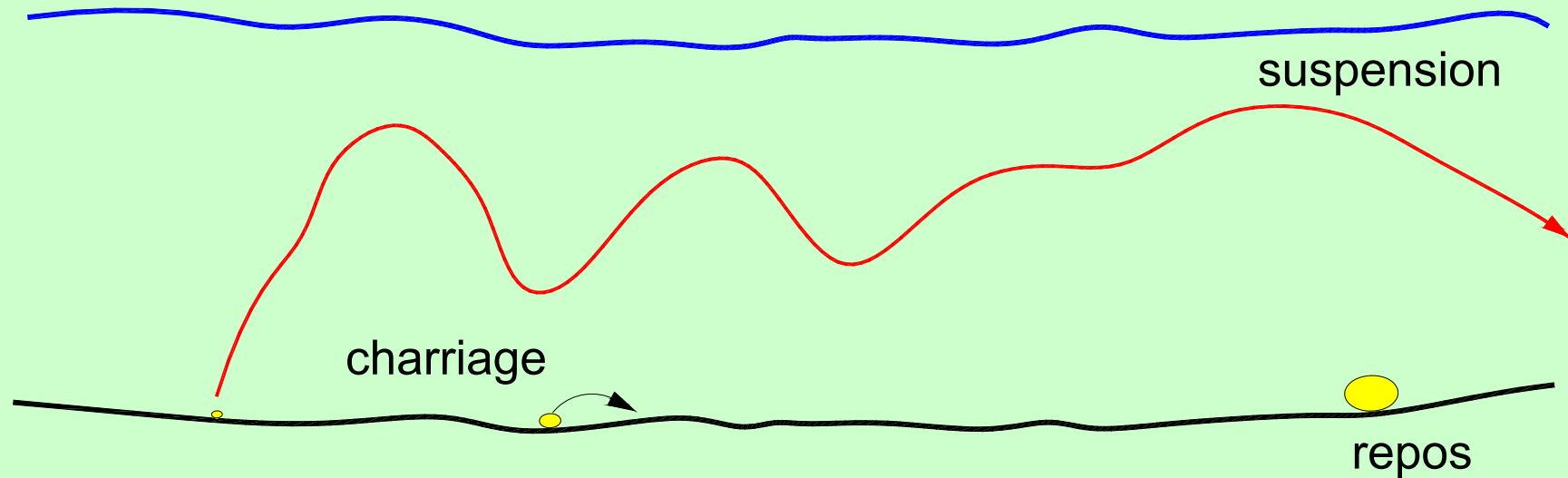
Cas d'un matériau de fond uniforme

Faisons croître la vitesse



Paramètres influençant le mode de transport

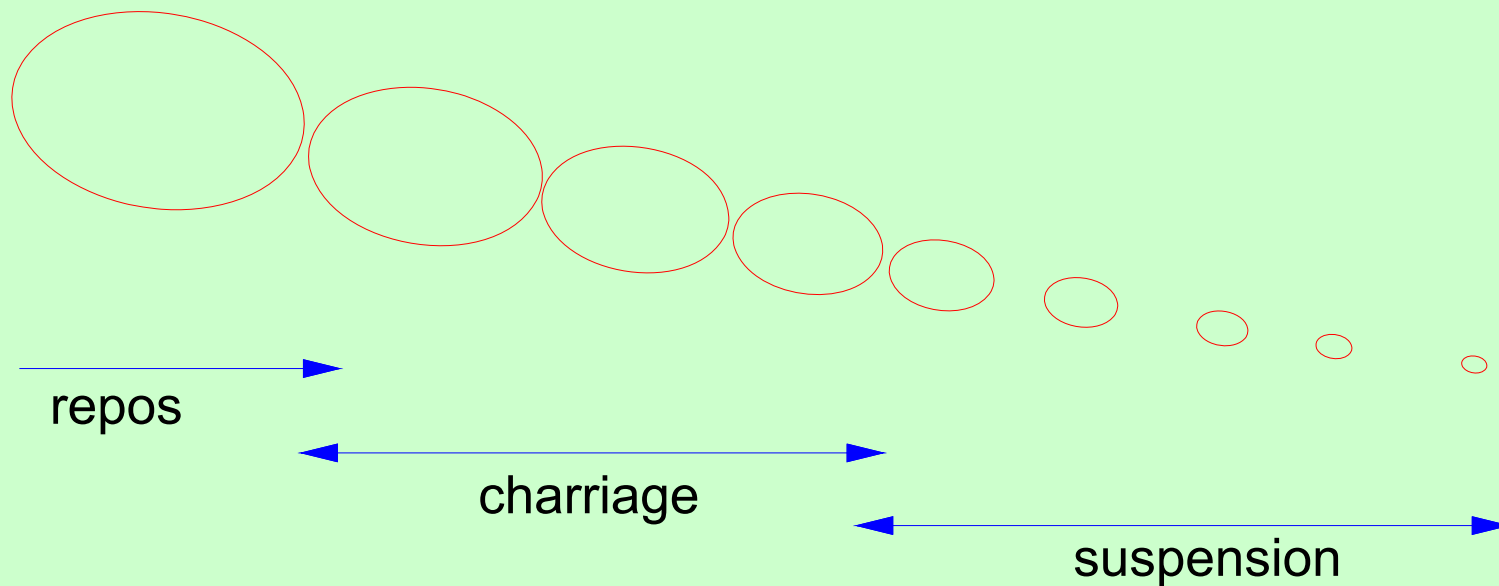
Cas d'un matériau de fond non uniforme



Paramètres influençant le mode de transport

Rôle de la taille des grains

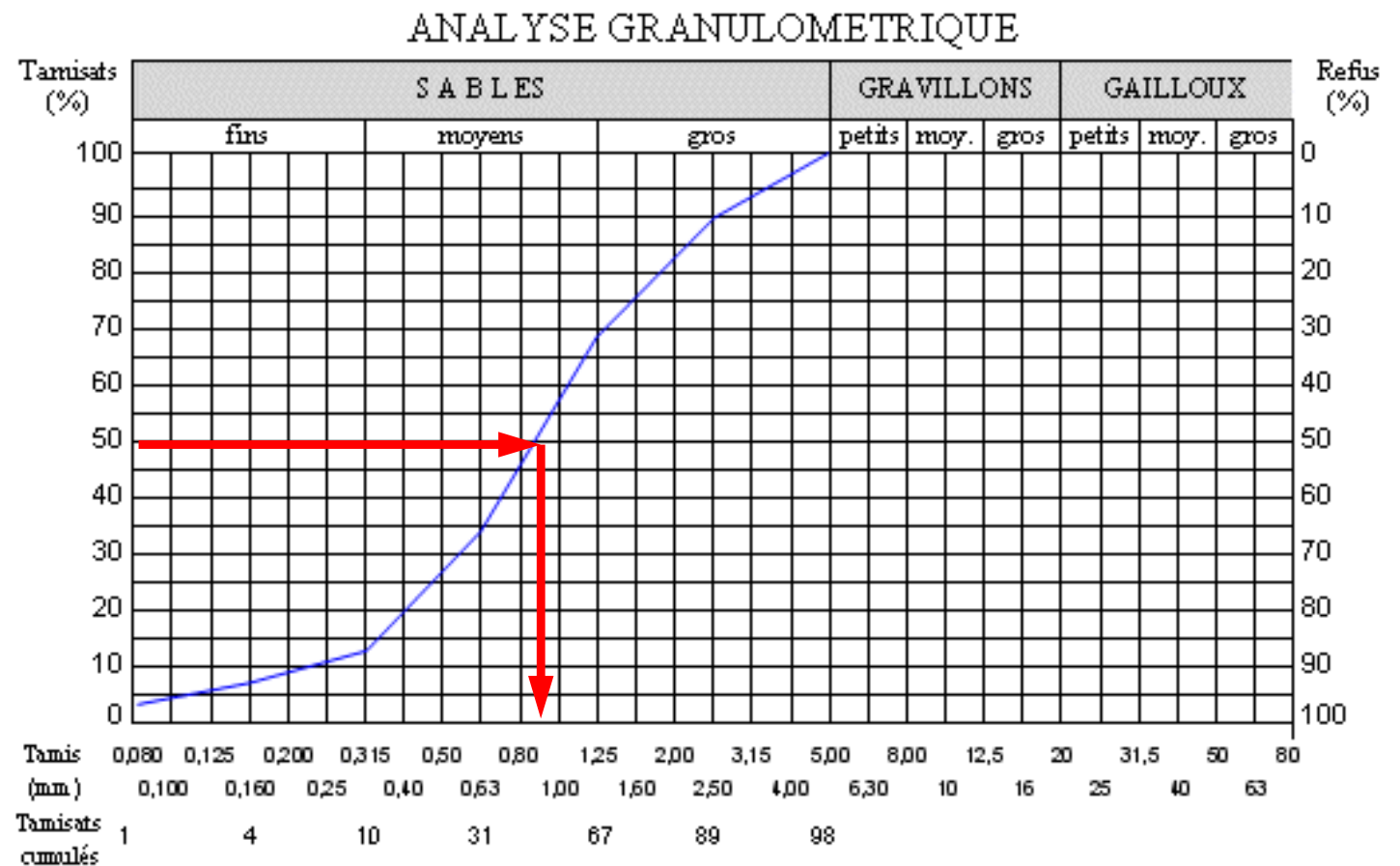
Pour un débit donné, il peut y avoir simultanément :



fondamental de l'identité d'un cours d'eau.

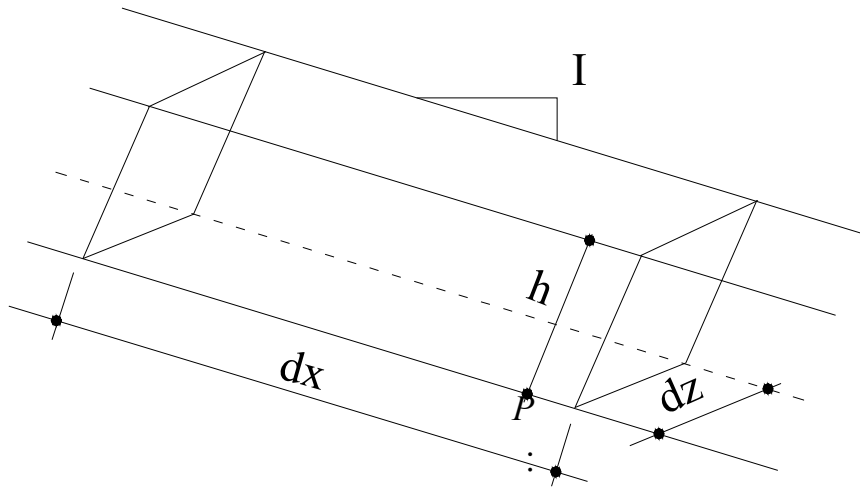
Kalinske : d_{50}

D'autres diamètres sont utilisés :



Notion de force tractrice

Soit un tube de courant dans un écoulement uniforme :



La force de frottement sur le fond vaut :

$$F = \tau . dx . dz$$

- τ : Contrainte de frottement sur le fond appelée **FORCE TRACTRICE**.
- dx, dz : Dimensions en plan du tube de courant.

Cette force de frottement équilibre la composante tangentielle de la force de pesanteur

$$F_t = P . \sin \alpha = P . I \quad \text{avec}$$

$$P = \rho . g . h . dx . dz$$

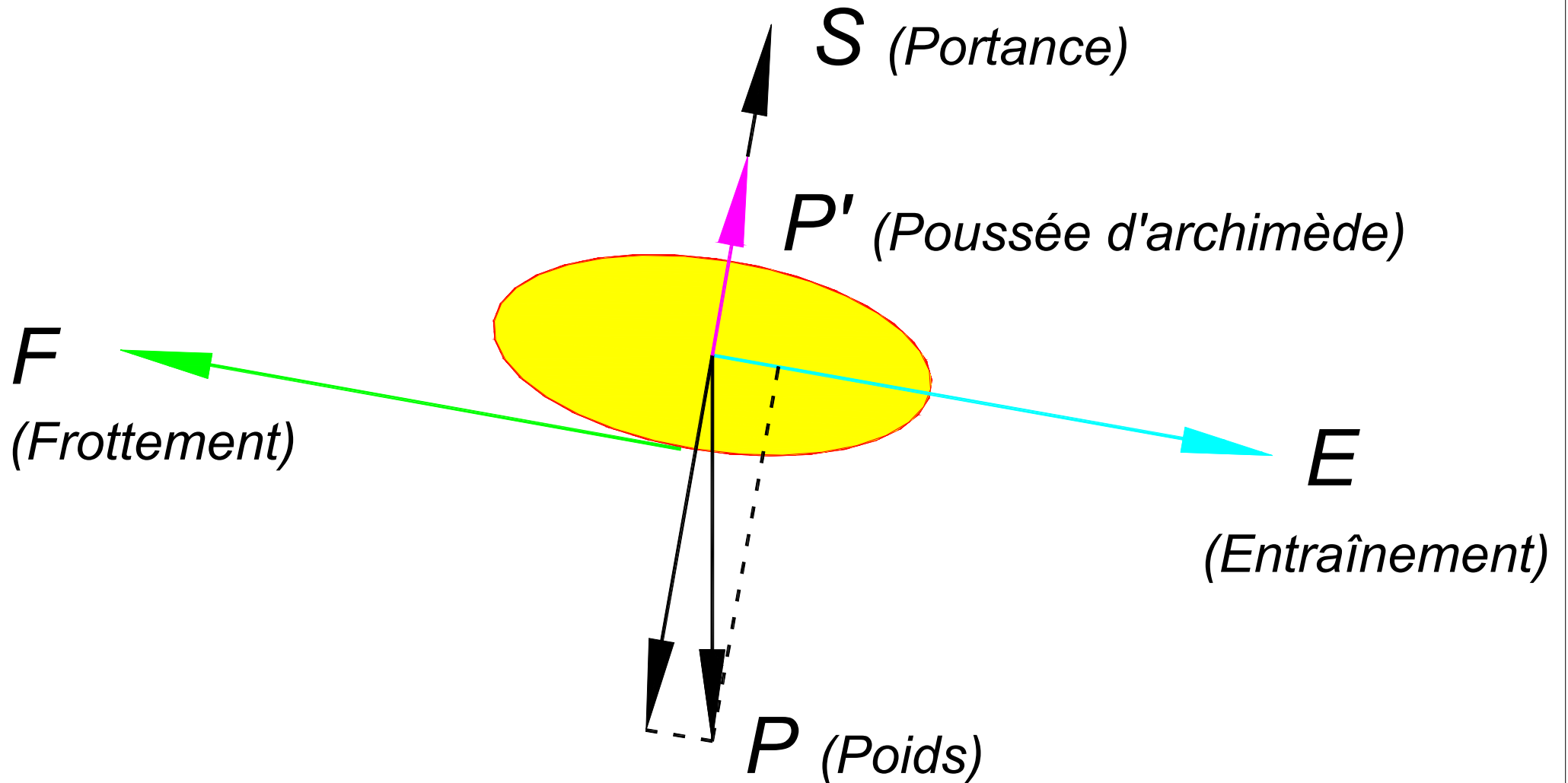
En remplaçant :

$$\tau . dx . dz = \rho . g . h . dx . dz . I$$

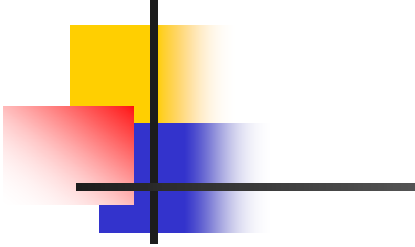
on obtient :

$$\tau = \rho . g . h . I$$

Équilibre d'un grain



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


$$F = a (\gamma_s - \gamma) d^3 \cos \alpha \cdot \tan \varphi$$

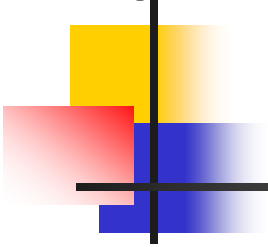
remplacée par :

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

où :

- **a** : Coefficient de forme.
- α : Angle d'inclinaison du lit du cours d'eau.
- **d** : Diamètre de la particule.
- φ : Coefficient de frottement grain sur grain mesuré sous l'eau (les grains sont supposés sans cohésion).

- La force d'entraînement due à l'écoulement est proportionnelle à la section du grain :



$$E = b \tau_o d^2$$

- **b** : un coefficient de forme
- τ_o : la force tractrice

$$\tau_o = \gamma R_H i$$

ou

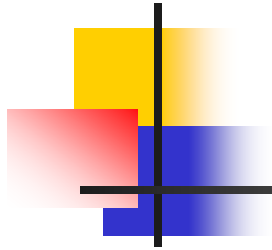
$$\tau_o = \gamma h i$$

- La portance (ou sustentation) peut être écrite sous la forme :

$$S = c \gamma d^2 \frac{V^2}{2 g}$$

- **c** : un coefficient de traînée
- **V** : la vitesse de l'eau au voisinage du fond

Au seuil de mise en mouvement :



$$E = F - P_t$$

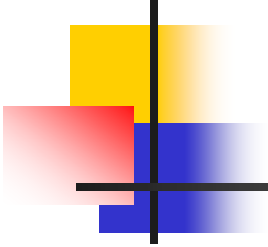
où :

- P_t est la composante tangentielle du poids P

La force tractrice limite (force tractrice critique) vaut donc :

$$b \tau_c d^2 = a (\gamma_s - \gamma) d^3 \tan \varphi - a (\gamma_s - \gamma) d^3 \sin \alpha$$

α Étant petit, d'où $\sin \alpha$ négligeable.



La **force tractrice critique** c'est-à-dire de début d'entraînement peut s'écrire sous la forme :

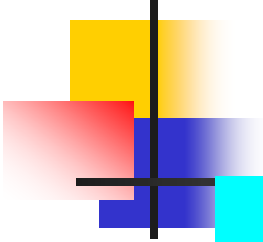
$$\tau_c = A (\gamma_s - \gamma) d \quad \text{où} \quad \tau_c > \tau$$

Avec :

$$A = a \tan \varphi / b$$

- **A** : Paramètre adimensionnel appelé “ **Paramètre de Shields** ”

A peut être écrit aussi sous la forme :


$$A = \frac{\gamma R_H i}{(\gamma_s - \gamma) d}$$

ou remplacer R_H par H

Déplacement du grain selon Ramette

$A < 0,027$

Le grain est au repos, le fond est plat.

$0,027 < A < 0,047$

Apparition des tous 1^{er} mouvements sans générer de débit solide.

$0,047 < A < 0,062$

CHARRIAGE sur fond plat

$0,062 < A < 0,25$

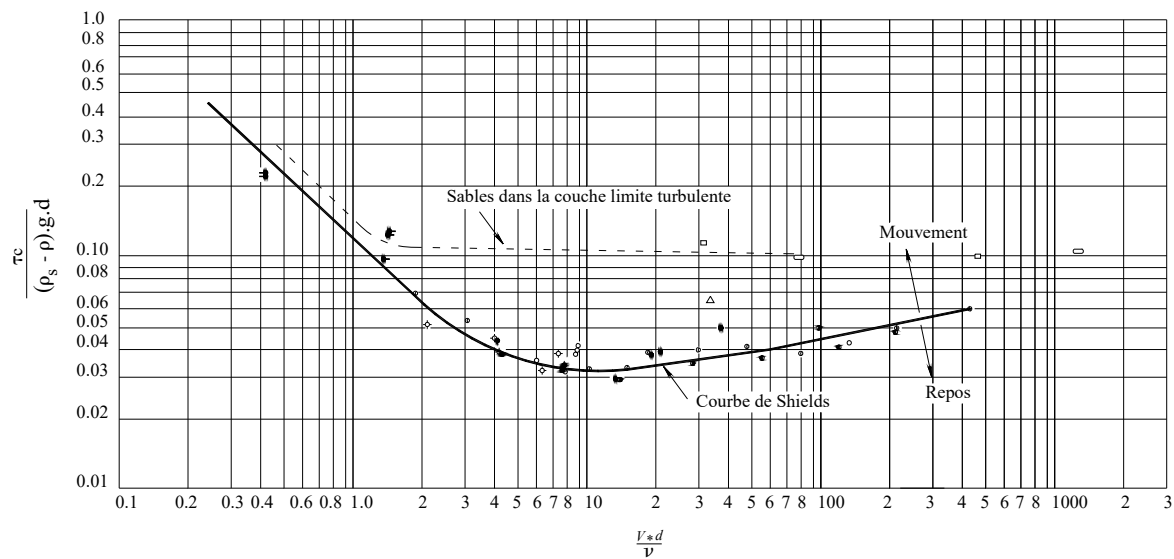
CHARRIAGE par dunes

$0,25 < A < 2,5$

SUSPENSION par dunes

$A > 2,5$

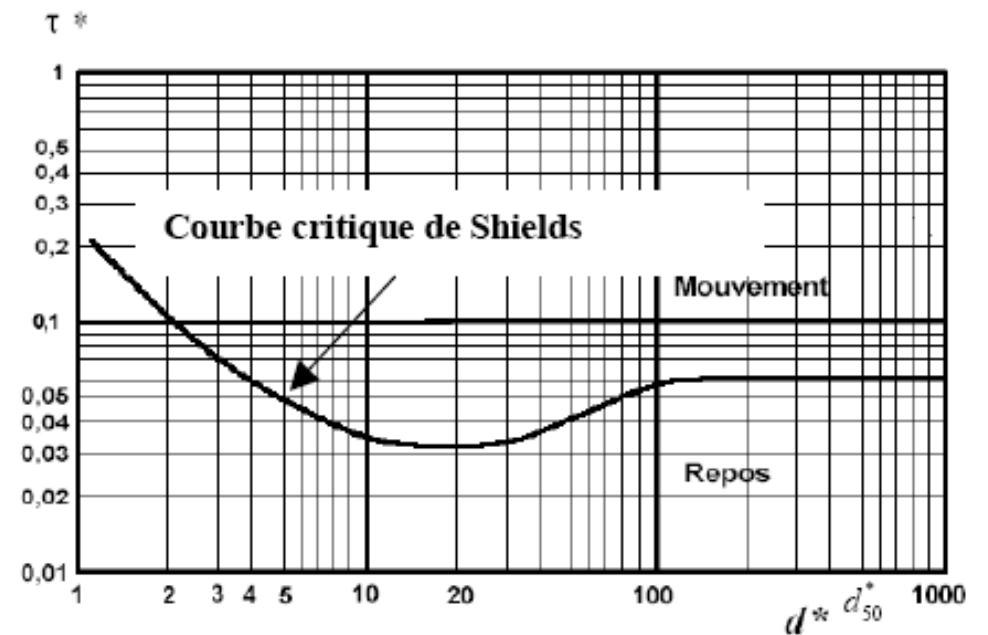
SUSPENSION sur fond plat



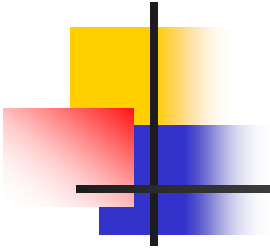
Profil de vitesse en turbulence complète	Sym	Déscription	$\gamma_s \cdot \text{g/cm}^3$
	○	Ambre	1.06
	●	Lignite	1.27
	■	Granite	2.7
	□	Baryte	4.25
	○	Sable (Casey)	2.65
	◇	Sable (Cramer)	2.65
	✦	Sable (U.S.W.E.S)	2.65
	●	Sable (Gilbert)	2.65

Couche limite turbulente	Sym	Déscription	$\gamma_s \cdot \text{g/cm}^3$
	✦	Sable (Vanoni)	2.65
	●	Billes de verre (Vanoni)	2.49
	□	Sable (White)	2.61
	○	Sable dans l'air (White)	2.10
	△	Billes d'acier (White)	7.9

Courbe de Shields (1936)



Formulations de Chézy et de Manning-Strickler



Dans un écoulement uniforme à surface libre, la vitesse d'écoulement peut être calculée par:

$$V = C \sqrt{R_H \cdot I}$$

Formule de Chezy

ou

$$V = K \cdot R_H^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

Formule de Manning Strickler

C: Coefficient de Chézy, il dépend de la nature des parois et du rayon hydraulique.

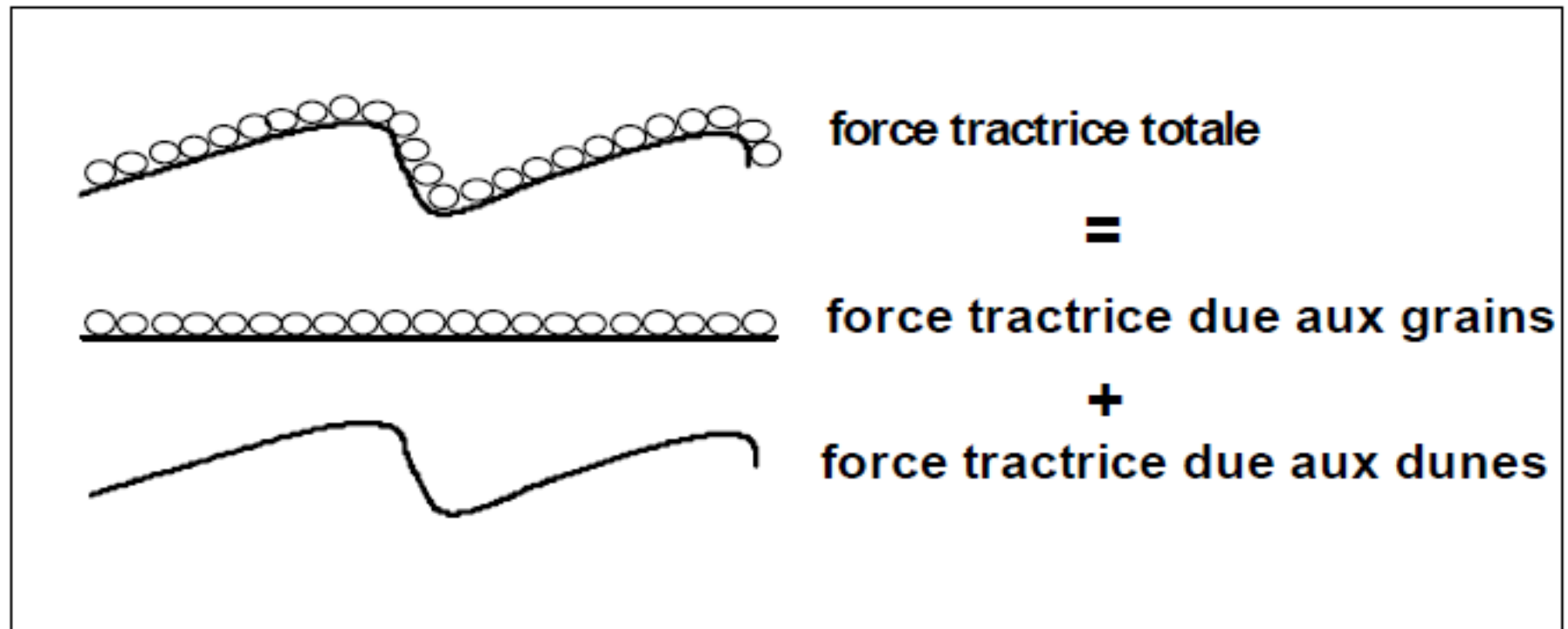
K: Coefficient de rugosité de Strickler. Il dépend de la rugosité des parois du chenal mais contrairement au coefficient de Chézy, il dépend très peu du tirant d'eau.

$$C = K \cdot R_H^{1/6}$$

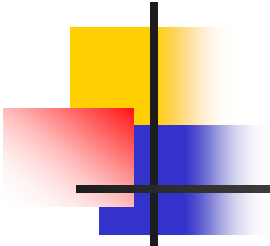
Quelques ordres de grandeur du coefficient de Strickler

Nature des parois	Valeur de K en $m^{1/3} / s$
Béton lisse	75-90
Canal en terre, non enherbé	60
Canal en terre, enherbé	50
Rivière de plaine, sans végétation arbustive	35-40
Rivière de plaine, large, végétation peu dense	30
Rivière à berges étroites très végétalisées	10-15
Lit majeur en prairie	20-30
Lit majeur en vigne ou taillis	10-15
Lit majeur urbanisé	10-15
Lit majeur en forêt	<10

Notion de force tractrice efficace :



La rugosité du fond (traduite par le coefficient K_f) est due à la fois à la rugosité individuelle des **grains**, ou rugosité de peau (coefficient K_{grains}) et à l'**irrégularité des fonds**, c'est à dire aux dunes. **Donc K_f est inférieur à K_{grains} .**



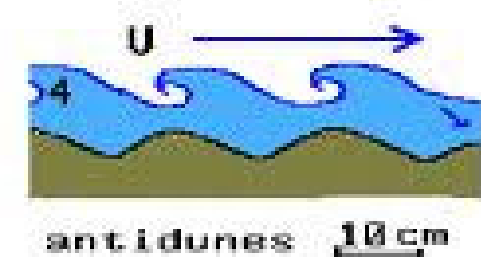
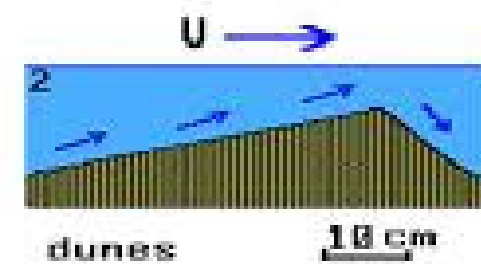
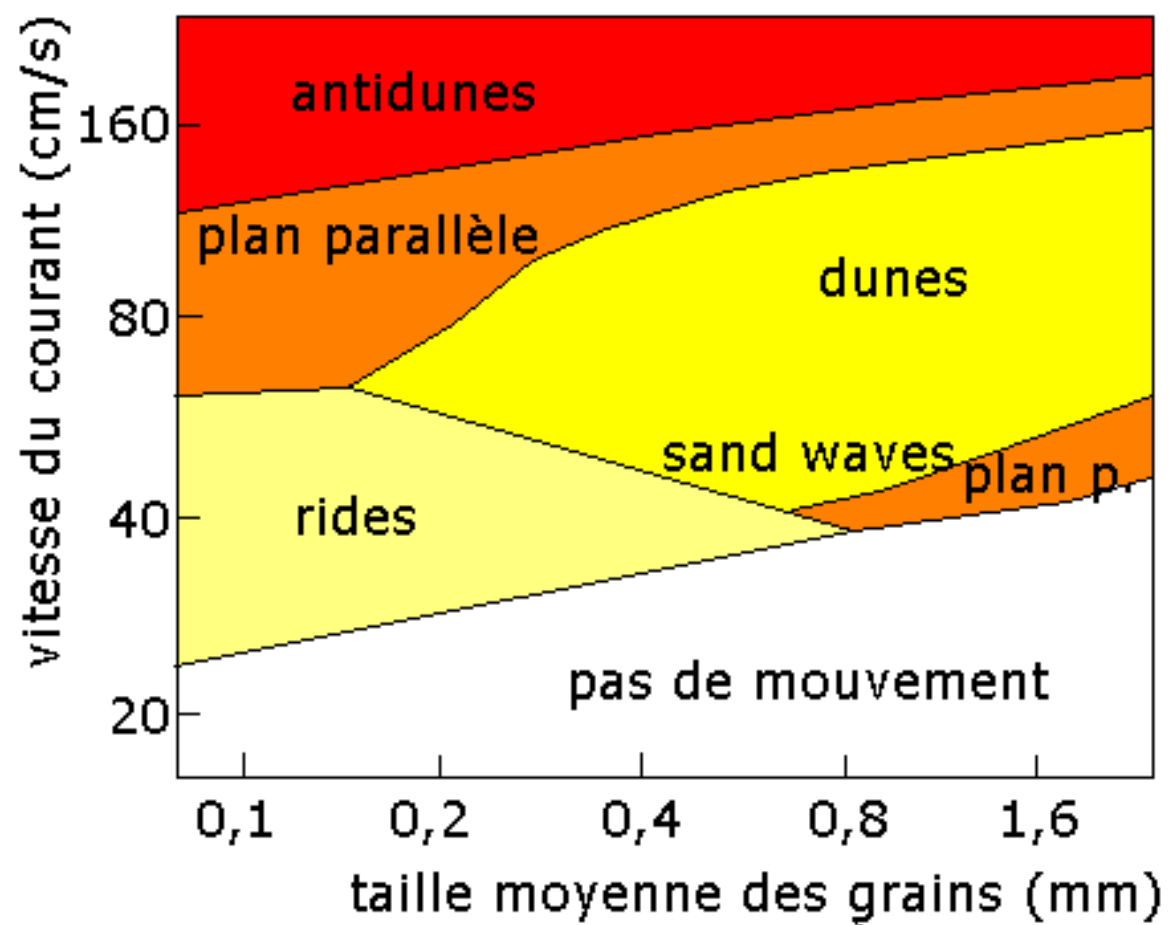
De même, la contrainte tractrice totale τ_0 peut être considérée comme la somme d'une contrainte tractrice due à la rugosité de peau $\beta.\tau_0$ et d'une contrainte tractrice due aux dunes. La contrainte tractrice $\beta.\tau_0$ qui n'est pas utilisée pour vaincre les frottements dus aux irrégularités du fond est appelée contrainte **tractrice efficace**.

$\tau_0 = \gamma_w \cdot R \cdot i$	contrainte tractrice totale.
$\beta.\tau_0$	contrainte tractrice due aux grains ; c'est la contrainte tractrice efficace.
$(1 - \beta)\tau_0$	contrainte tractrice due aux dunes.

On admet généralement que :

$$\beta = \left(\frac{K_f}{K_{\text{grains}}} \right)^{3/2}$$

β est un paramètre adimensionnel compris entre **0,35** et **1**



1

1. Rides laissées par la marée dans un estuaire

2. Rides dont les crêtes ont une forme arrondie, (caractéristique d'un écoulement lent, ou eau peu profonde)

3. Anti-dunes : le courant, est assez rapide

4. Dunes surmontées par des rides

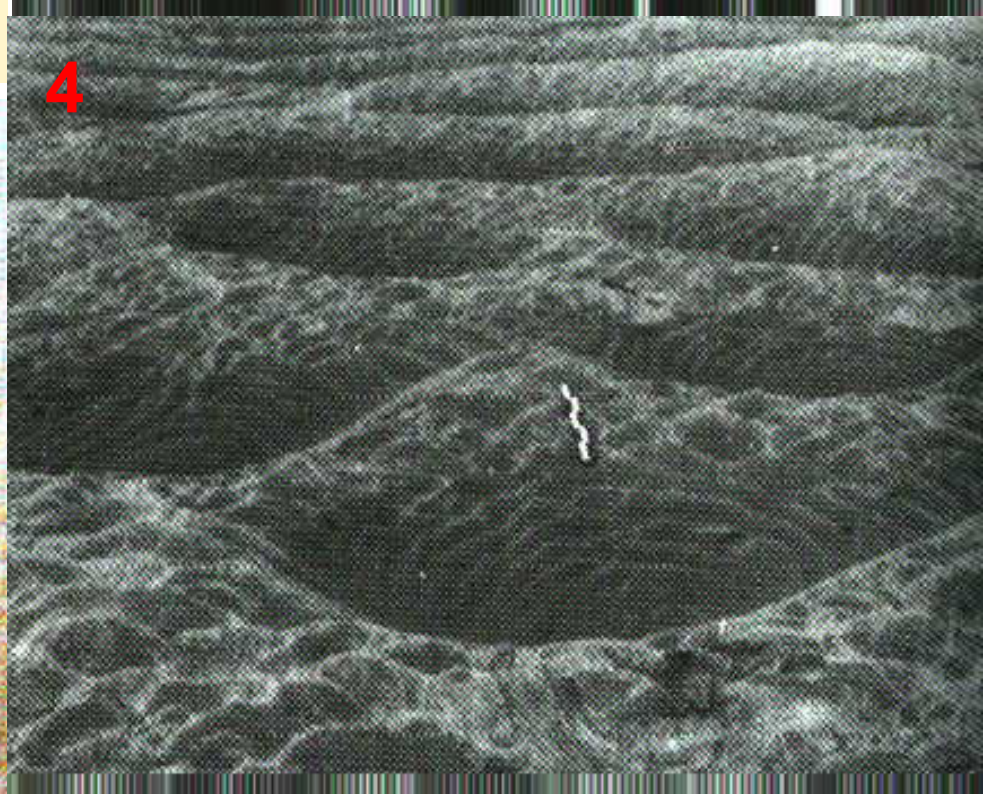
2

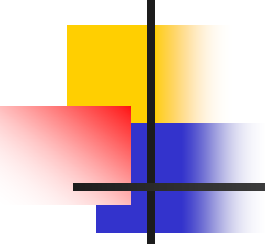


3



4





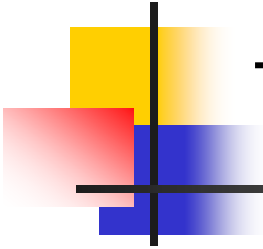
Rugosité des grains

$$K_{\text{grains}} = \left(\frac{21,1}{(d_{50})^{1/6}} \right)$$

pour une granulométrie étalée ou uniforme

$$K_{\text{grains}} = \left(\frac{26}{(d_{90})^{1/6}} \right)$$

pour une granulométrie serrée



Tri granulométrique, pavage



Dans un cours d'eau, de l'amont vers l'aval, la pente décroît (en moyenne), ce qui entraîne un dépôt des éléments les plus grossiers dans le cours amont alors que les éléments les plus fins continuent à transiter vers l'aval.

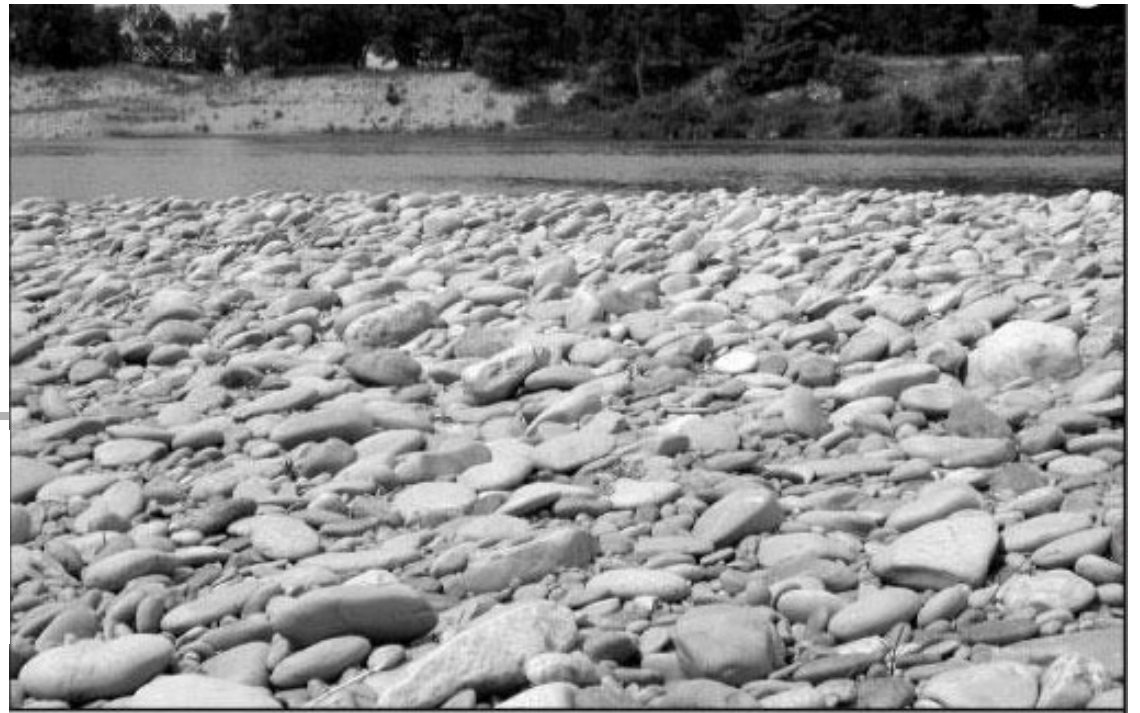
Ainsi, dans la partie amont, l'étendue granulométrique est large (par exemple blocs, cailloux, graviers, sables et même limons). Lorsque la plaine est atteinte, l'étendue granulométrique se resserre.

Dans la partie amont où les rivières sont torrentielles, le charriage de tous les jours enlève les parties fines, et laisse en surface une couche de matériaux grossiers, qui constitue peu à peu une protection des sédiments sous jacents.

Cette couche protectrice est appelée **PAVAGE**



La couche de pavage a un rôle différent sur le transport solide en fonction du débit liquide :



- ▶ Pour les faibles débits, jusqu'à une certaine valeur seuil, la protection du fond est totale et aucun grain du fond ne peut être emporté : le pavage est dit statique ;
- ▶ Pour les débits plus forts, jusqu'à un second seuil, quelques grains de la couche pavée commencent à se déplacer par charriage. Les sédiments sous-jacents peuvent alors être mis en mouvement, par suspension, mais le transport solide total reste très faible : le pavage est dit dynamique ;
- ▶ Enfin, au-delà du second seuil, la couche pavée est entièrement détruite et tous les sédiments peuvent participer au transport solide qui devient intense.

La capacité de transport d'une rivière à lit pavé ne peut pas être assurée que pour des écoulements importants.