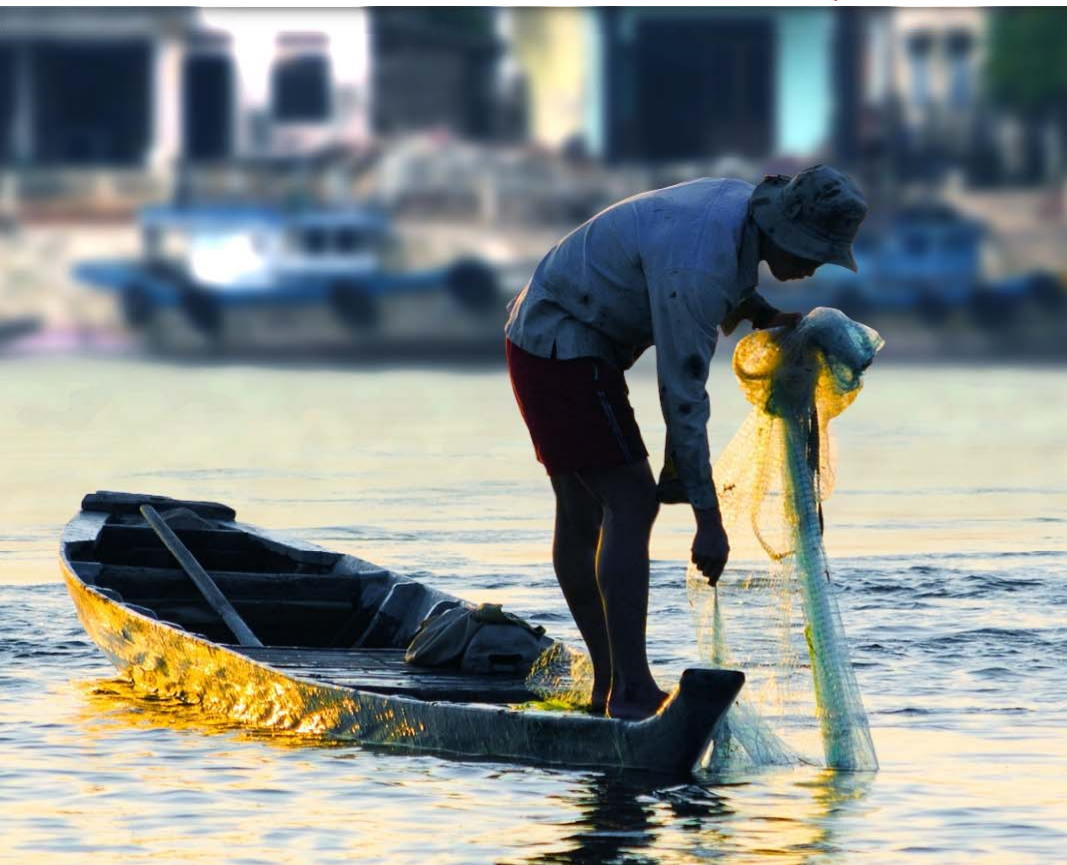


Des rivières  
et des hommes



# Lois physiques

Transport solide par charriage  
Sandra Soares-Frazão



Dans le cadre de



**RESCIF**

Réseau d'excellence  
des sciences de l'ingénieur  
de la Francophonie



Sandra Soares-Frazão  
UCLouvain

Charriage

**Objectif:** introduire le débit solide charrié et les formules de calcul usuelles





Sandra Soares-Frazão  
UCLouvain

## Charriage

### 1. Formes de fond

### 2. Rugosité

### 3. Relation $Q-h$

### 4. Lois de transport

### 5. Applicabilité

# Transport solide par charriage

## Formes de fond

- Définition et illustration

## Rugosité de grains et de forme

- Effet des formes de fond sur la rugosité
- Diagramme d'Engelund et Hansen

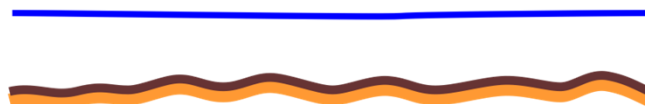
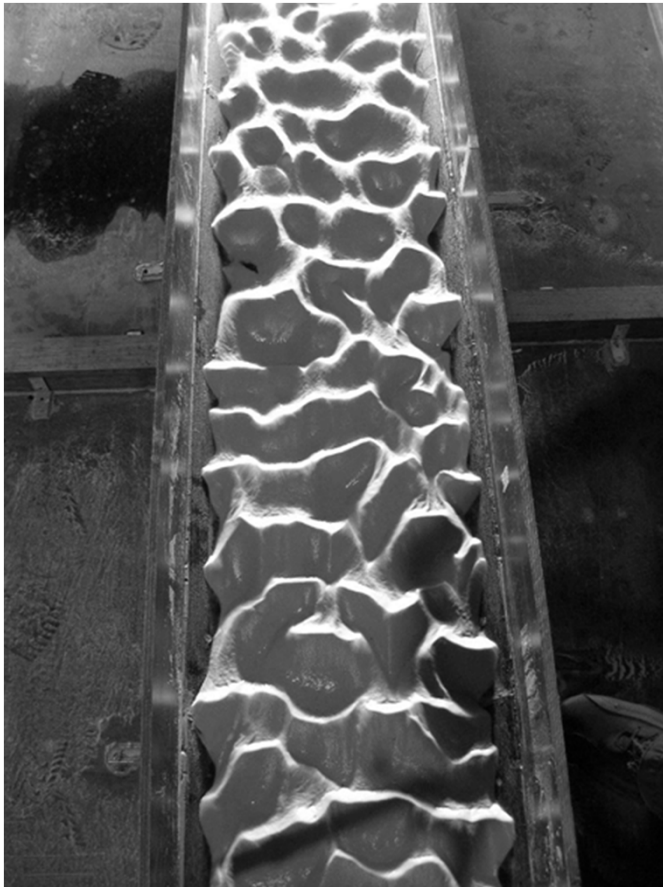
## Relation hauteur-débit

## Lois de transport

- Meyer-Peter & Müller
- Autres lois

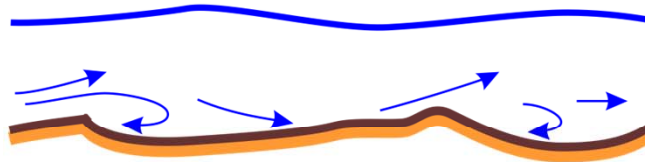
## Conditions d'application des lois de transport

# Formes de fond



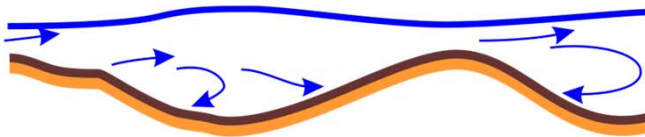
Rides

Faible bouillonnement

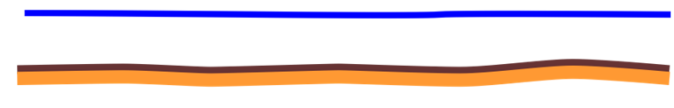


Dunes et rides

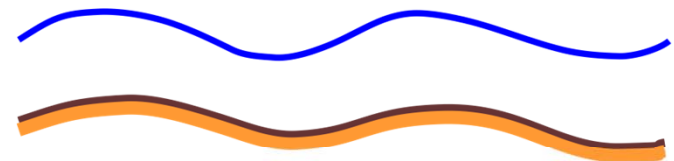
Bouillonnement



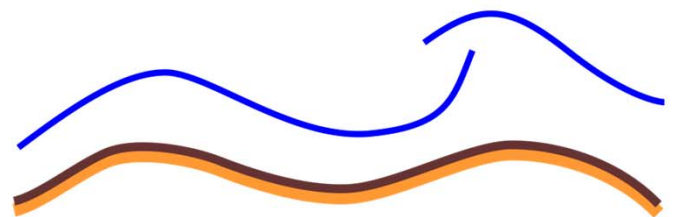
Dunes



Lit plat



Antidunes



Antidunes et déferlement

# Formes de fond



Dunes

Antidunes





Sandra Soares-Frazão  
UCLouvain

## Charriage

1. Formes de fond

2. Rugosité

3. Relation  $Q-h$

4. Lois de transport

5. Applicabilité

# Transport solide par charriage

## Plan et objectif

### Formes de fond

- Définition et illustration

### Rugosité de grains et de forme

- Effet des formes de fond sur la rugosité
- Diagramme d'Engelund et Hansen

### Relation hauteur-débit

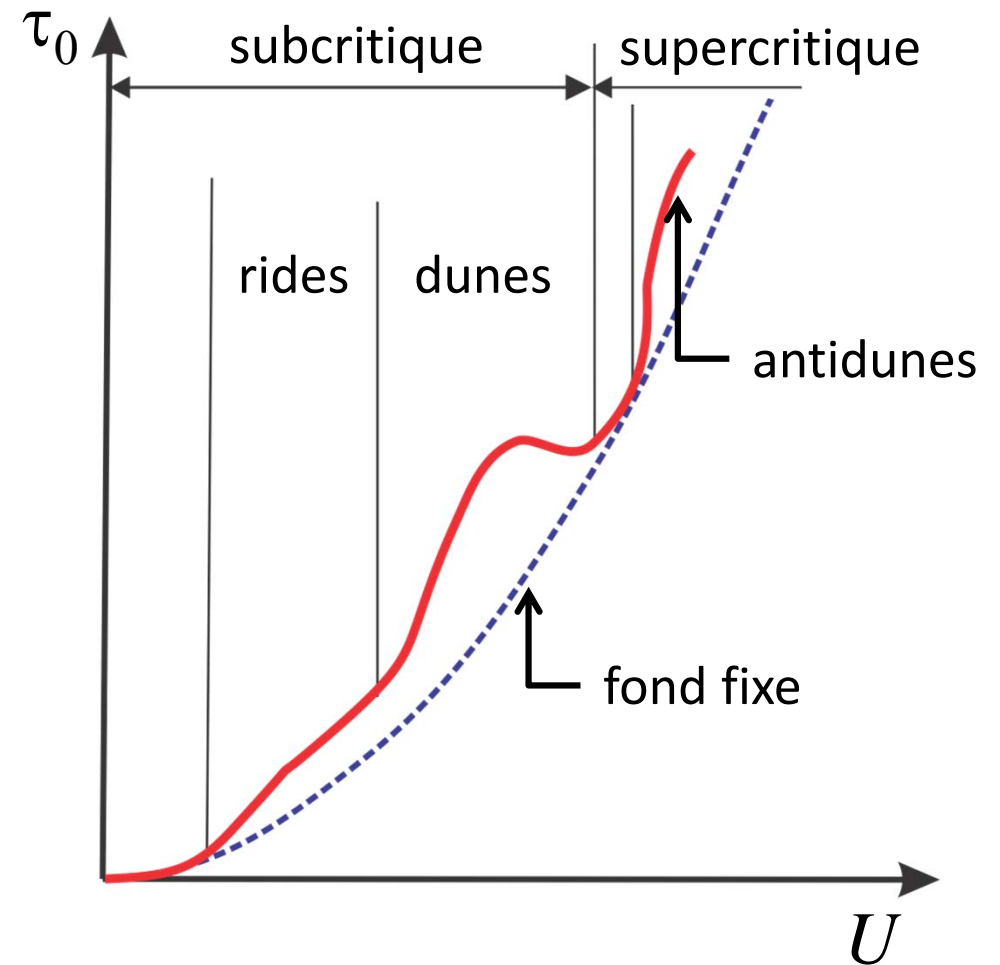
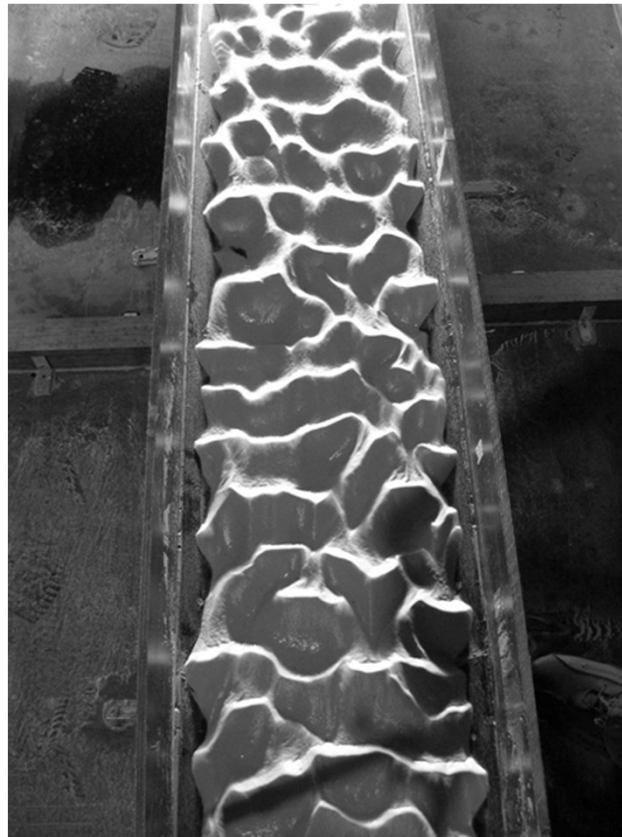
### Lois de transport

- Meyer-Peter & Müller
- Autres lois

### Conditions d'applications des lois de transport

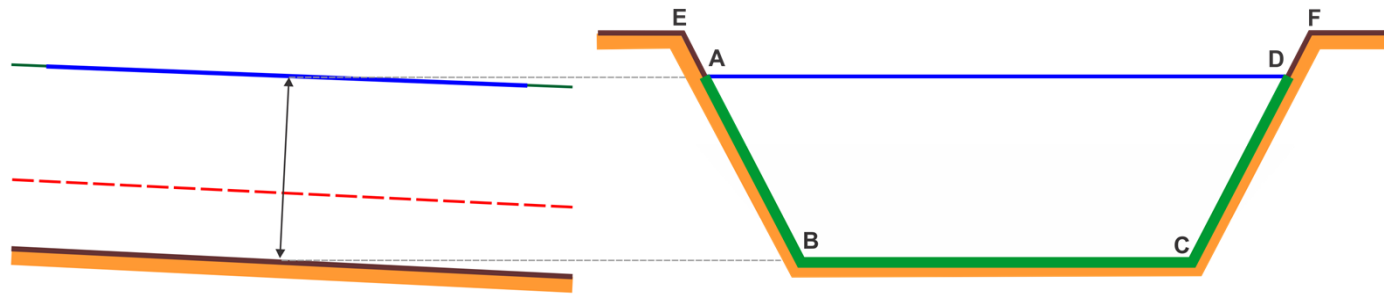
# Rugosité de grains et de forme

Influence des formes de fond sur la rugosité



# Rugosité de grains et de forme

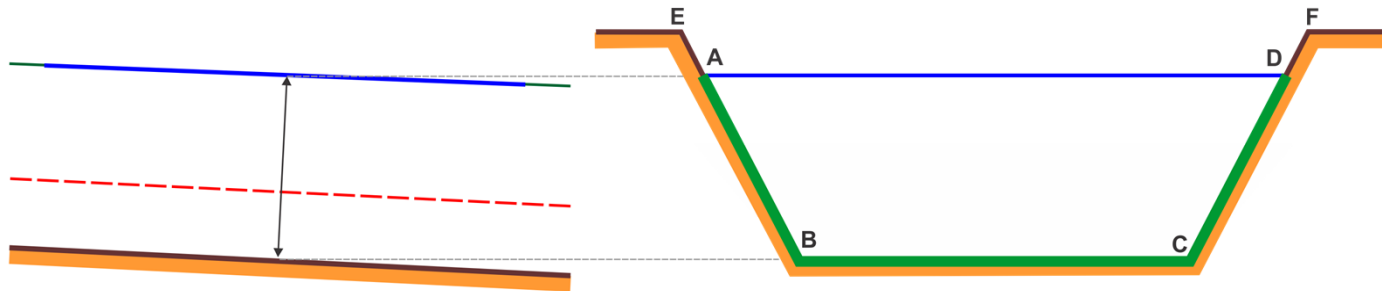
En écoulement uniforme :  $\tau_0 = \gamma R S_0$



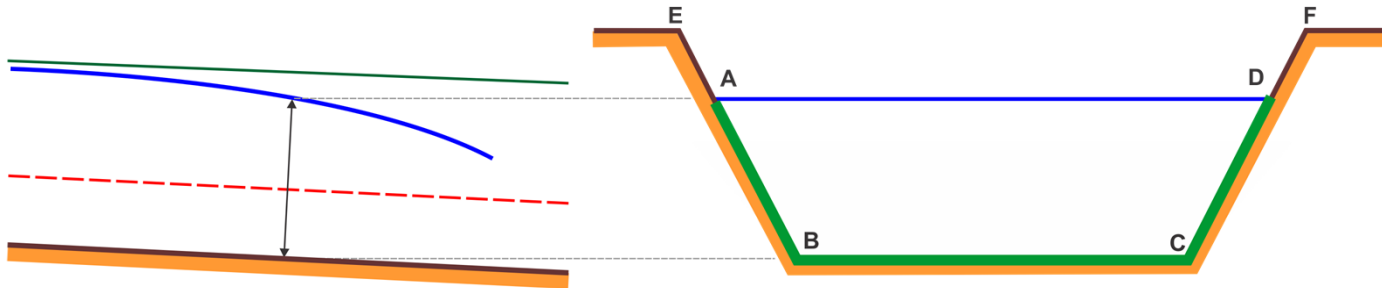


# Rugosité de grains et de forme

En écoulement uniforme :  $\tau_0 = \gamma R S_0$



En écoulement varié :  $\tau_0 = \gamma R S_f$



avec 
$$S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} = \frac{V^2}{K^2 R^{4/3}}$$

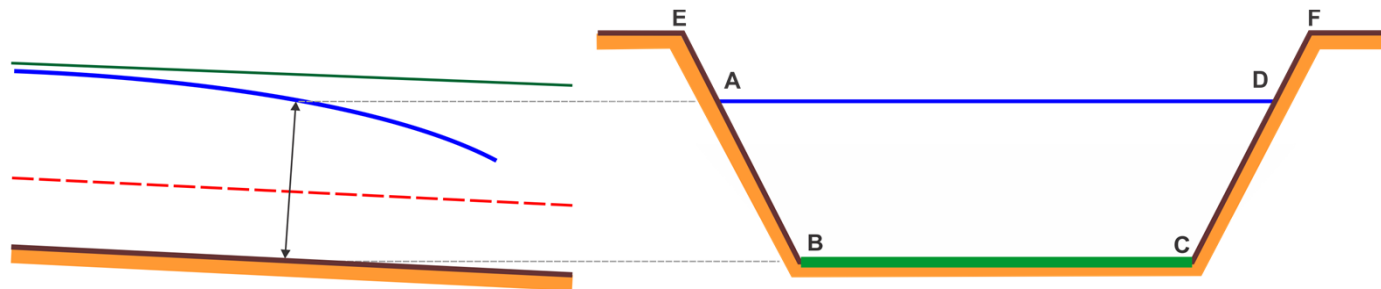
formule de Manning-Strickler

# Rugosité de grains et de forme

Frottement sur le lit uniquement:  $\tau_b = \gamma R_b S_f$

avec  $S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} = \frac{V^2}{K^2 R^{4/3}}$

formule de Manning-Strickler



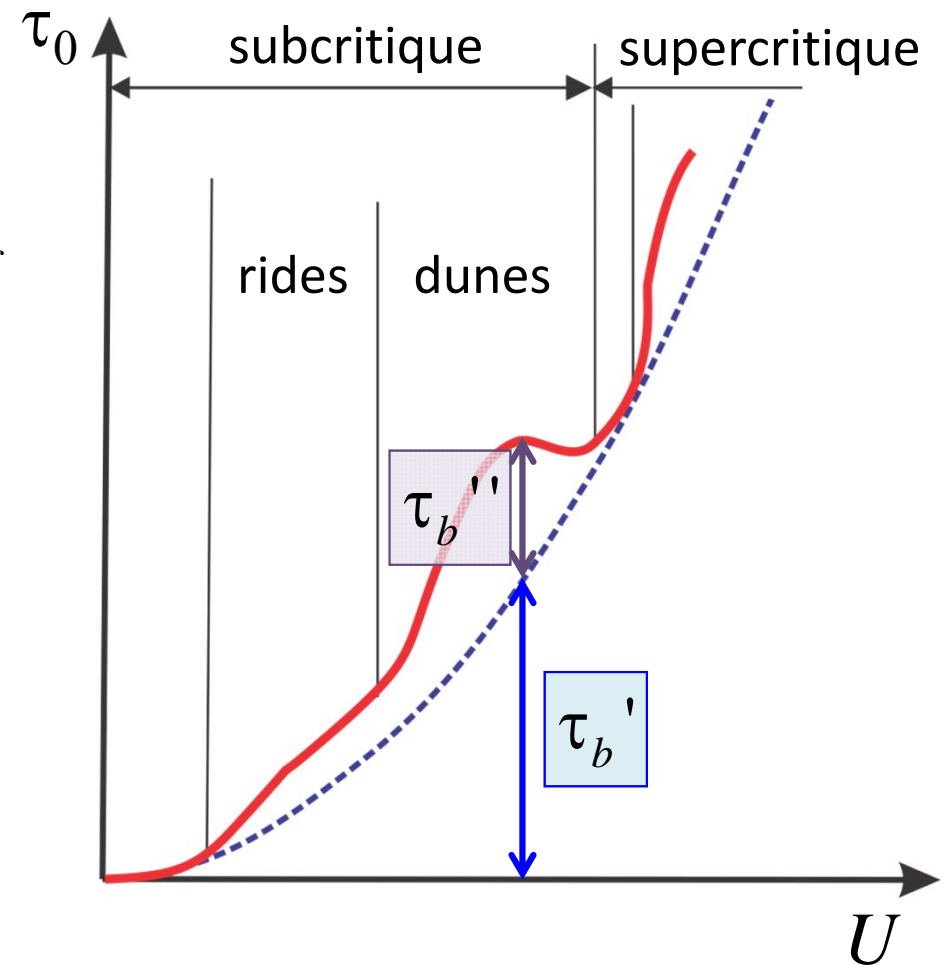
# Rugosité de grains et de forme

Avec des formes de fond:

$$\tau_b = \gamma R_b S_f = \tau_b' + \tau_b'' = \gamma (R_b' + R_b'') S_f$$

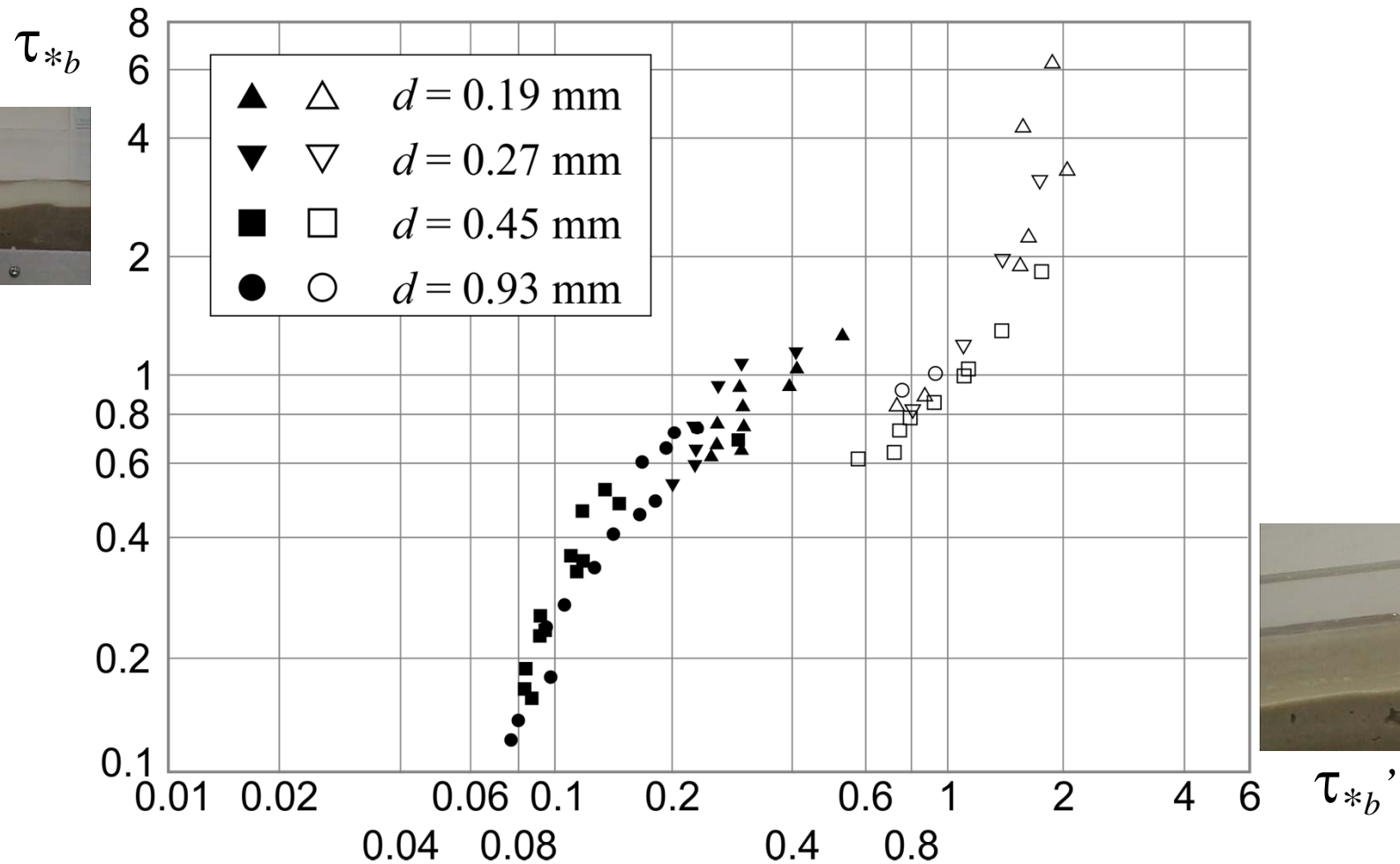
$$\tau_{*b}' = \frac{\tau_b'}{(\gamma_s - \gamma) d} = \frac{\gamma R_b' S_f}{(\gamma_s - \gamma) d}$$

$$\tau_{*b}'' = \frac{\tau_b''}{(\gamma_s - \gamma) d} = \frac{\gamma R_b'' S_f}{(\gamma_s - \gamma) d}$$

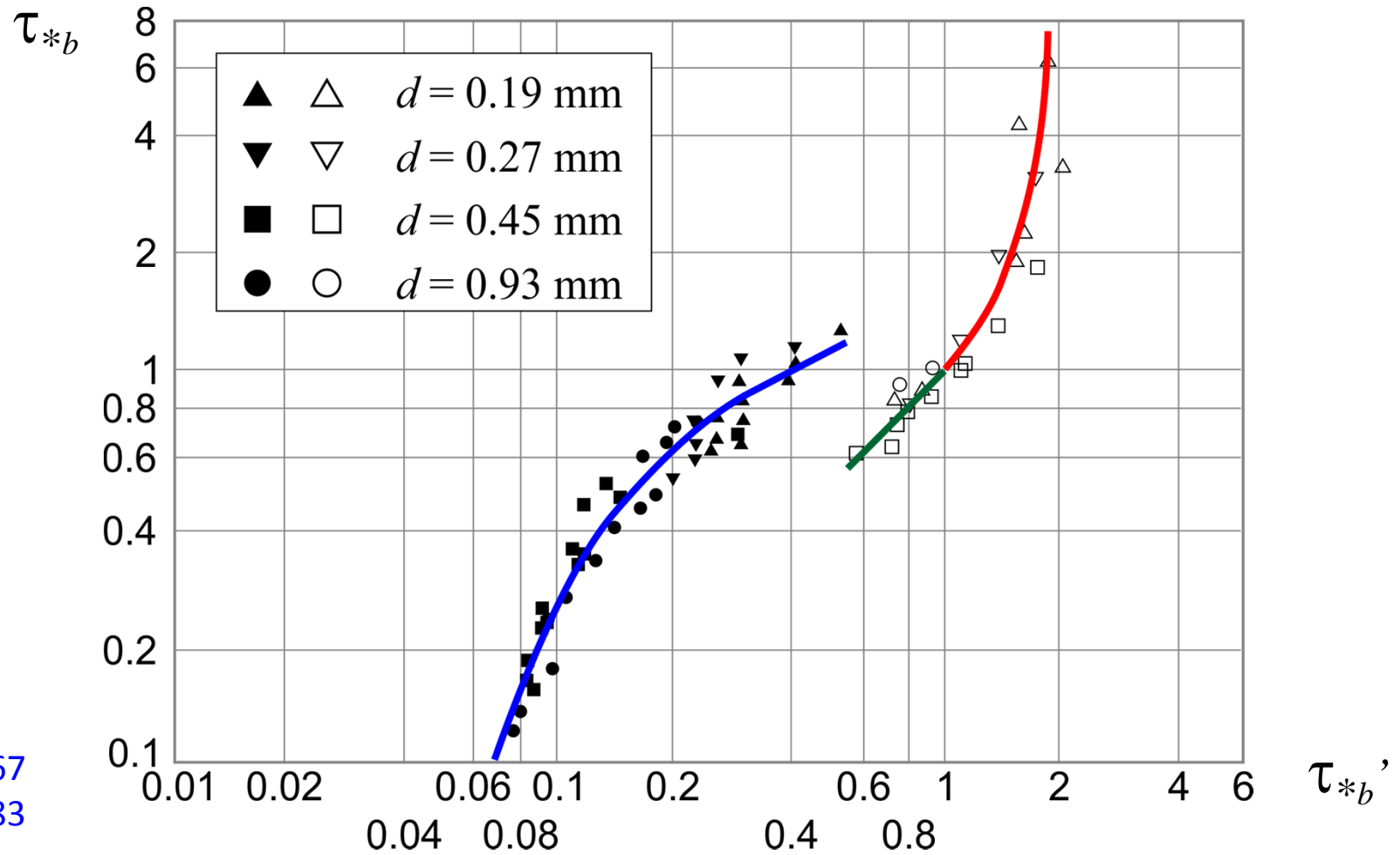


# Diagramme d'Engelund et Hansen

Engelund - Hansen, 1967  
Brownlie, 1983



# Diagramme d'Engelund et Hansen

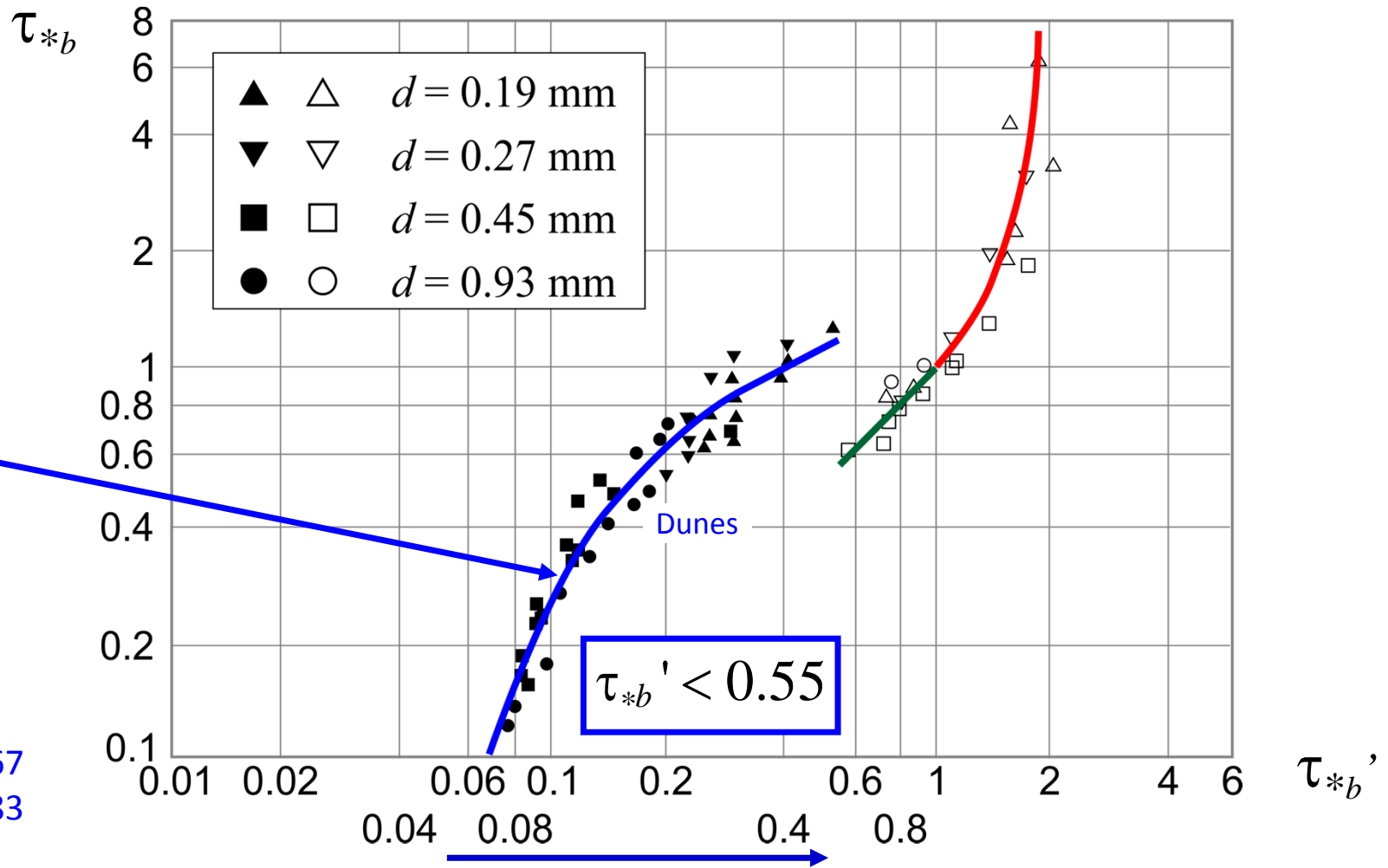


Engelund - Hansen, 1967  
Brownlie, 1983

# Diagramme d'Engelund et Hansen

## Dunes

$$\tau_{*b}' = 0.4 \tau_{*b}^2 + 0.06$$

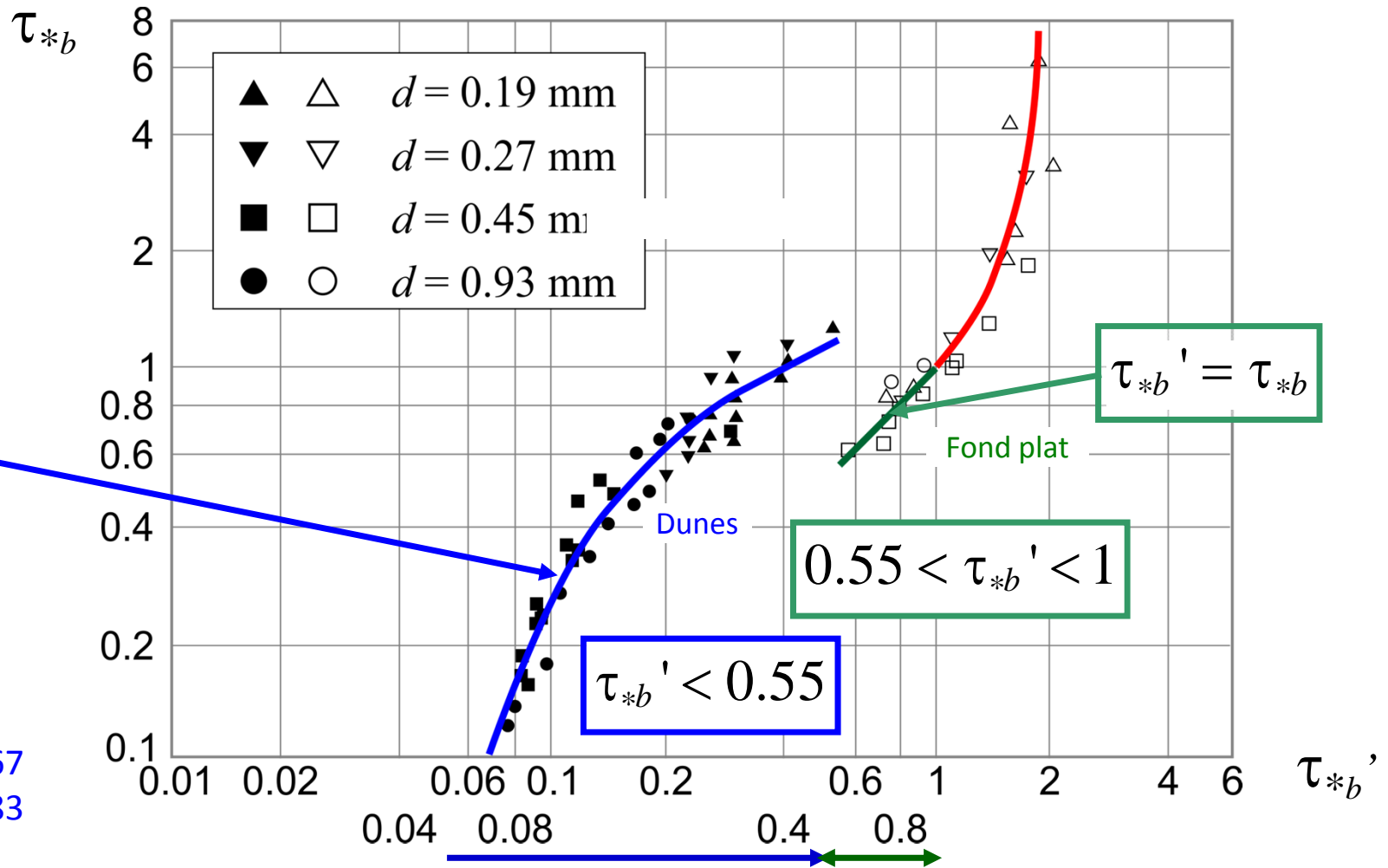


Engelund - Hansen, 1967  
Brownlie, 1983

# Diagramme d'Engelund et Hansen

Transition  
Fond plat

$$\tau_{*b}' = 0.4 \tau_{*b}^2 + 0.06$$

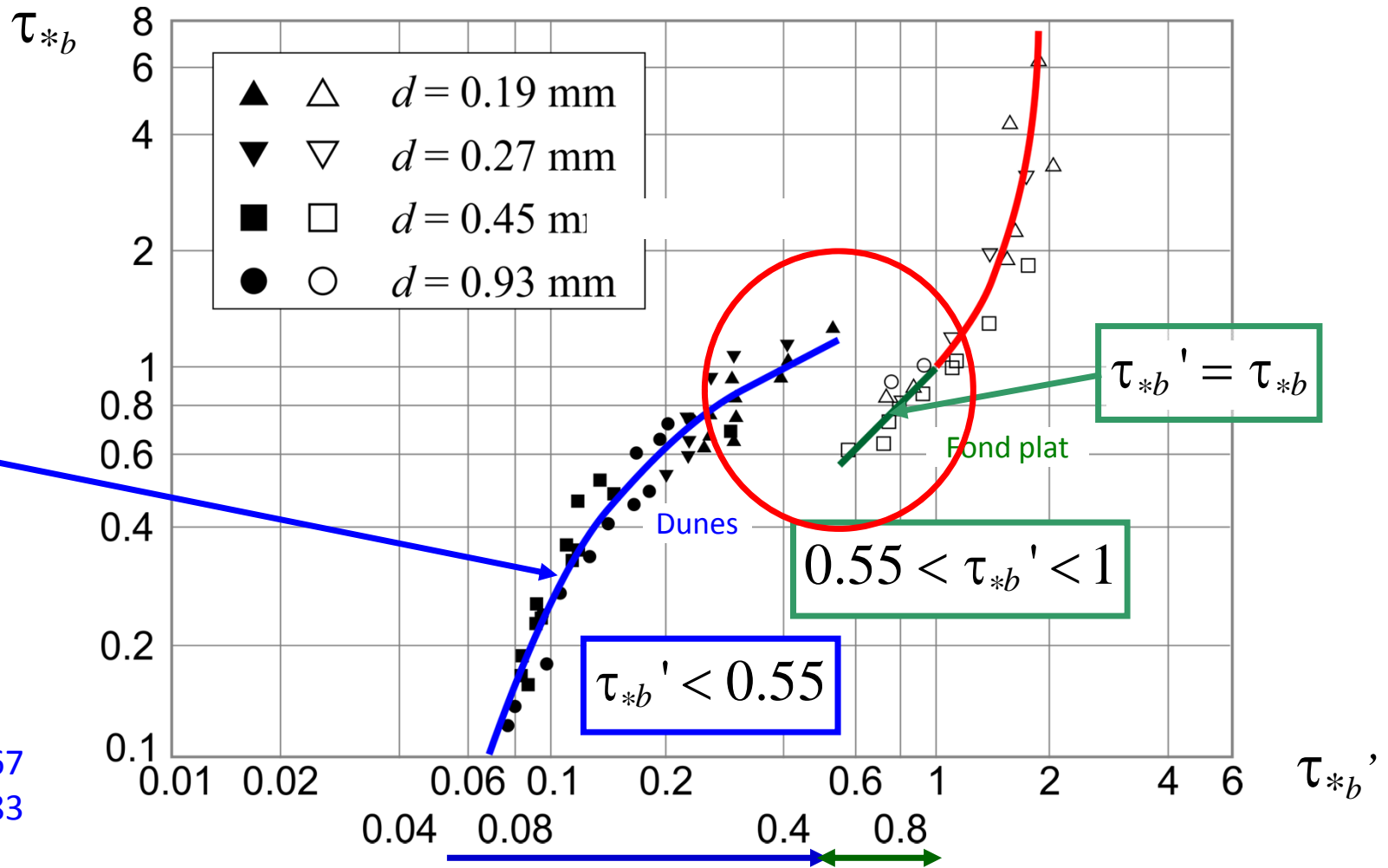


Engelund - Hansen, 1967  
Brownlie, 1983

# Diagramme d'Engelund et Hansen

Transition  
Fond plat

$$\tau_{*b}' = 0.4 \tau_{*b}^2 + 0.06$$



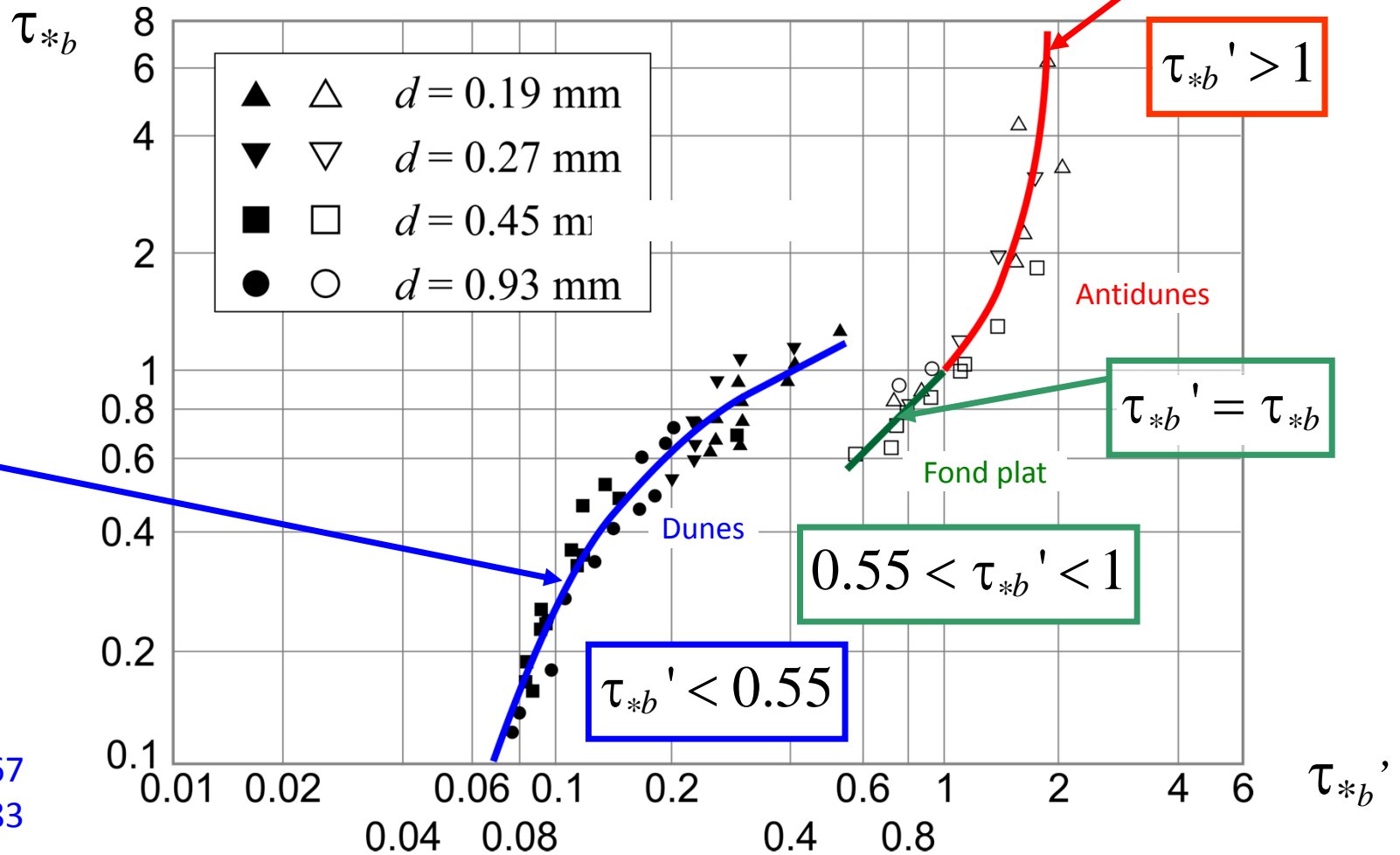


# Diagramme d'Engelund et Hansen

Antidunes

$$\tau_{*b}' = \left( 0.702 \tau_{*b}^{-1.8} + 0.298 \right)^{-0.556}$$

$$\tau_{*b}' = 0.4 \tau_{*b}^2 + 0.06$$



Engelund - Hansen, 1967  
Brownlie, 1983



Sandra Soares-Frazão  
UCLouvain

## Charriage

1. Formes de fond

2. Rugosité

3. Relation  $Q-h$

4. Lois de transport

5. Applicabilité

# Transport solide par charriage

## Plan et objectif

### Formes de fond

- Définition et illustration

### Rugosité de grains et de forme

- Effet des formes de fond sur la rugosité
- Diagramme d'Engelund et Hansen

### Relation hauteur-débit

### Lois de transport

- Meyer-Peter & Müller
- Autres lois

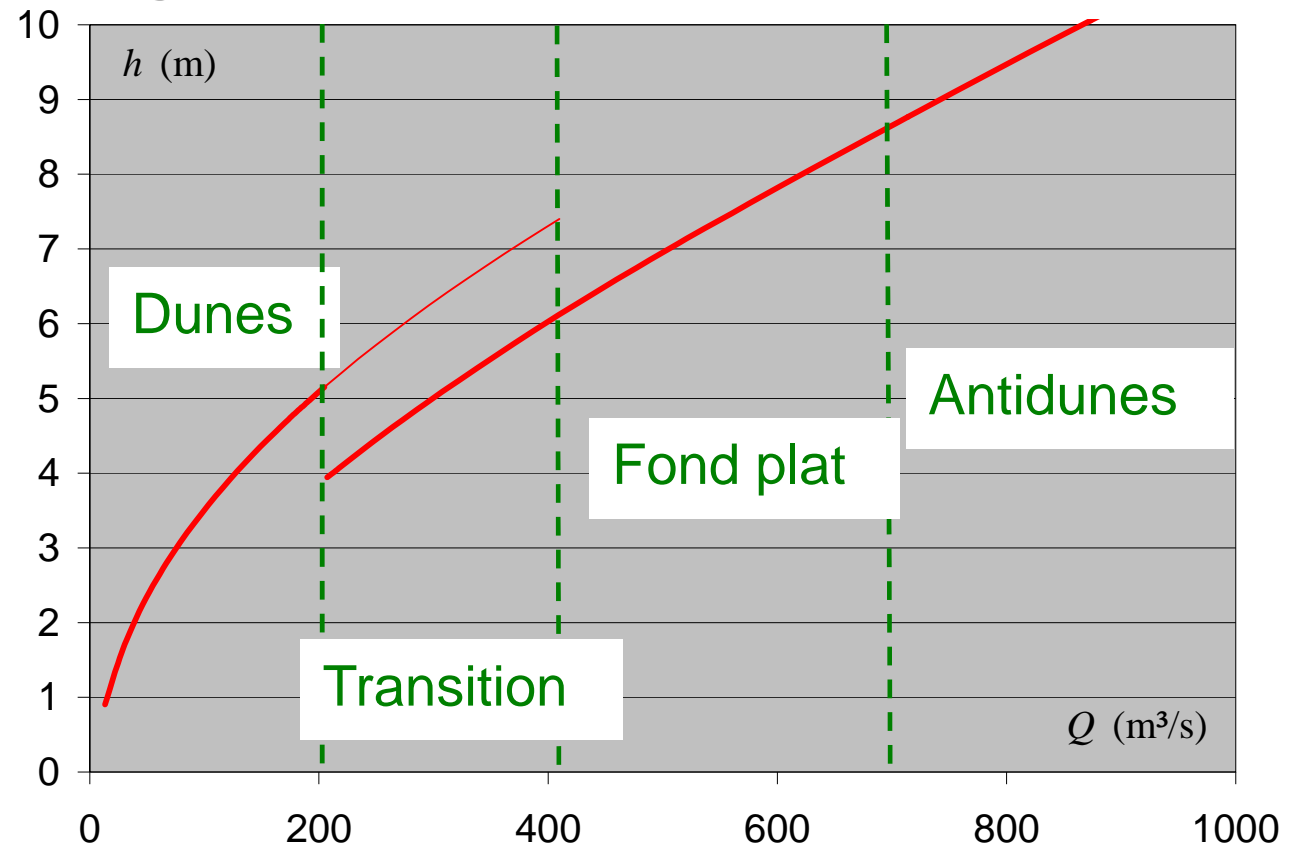
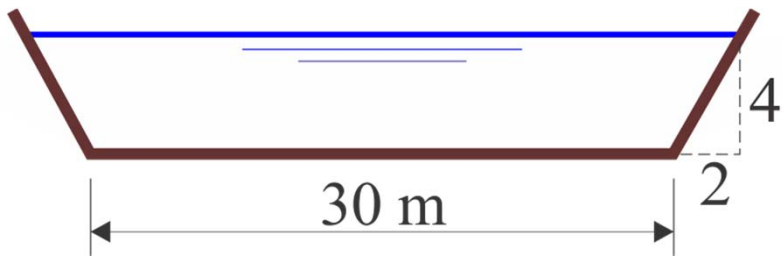
### Conditions d'application des lois de transport

# Relation hauteur-débit

## Application du diagramme d'Engelund-Hansen

### Exemple:

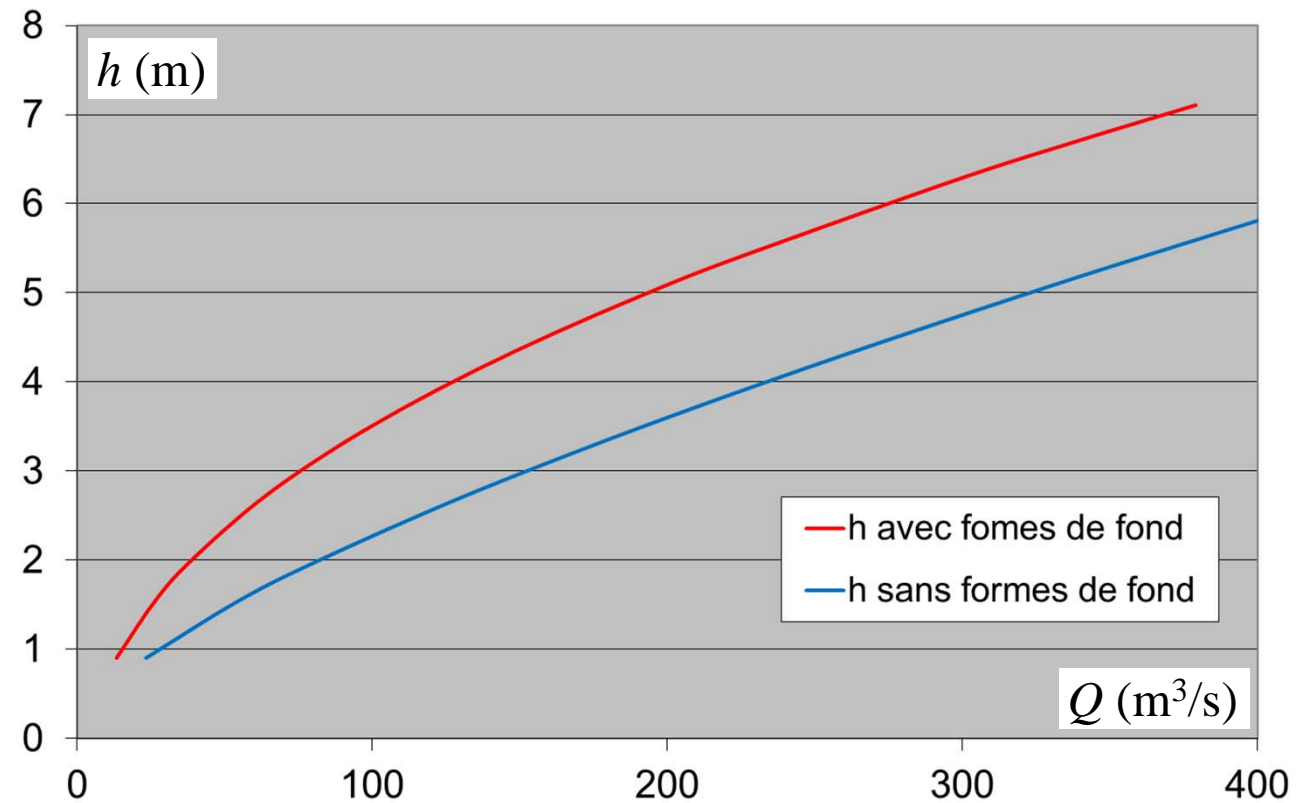
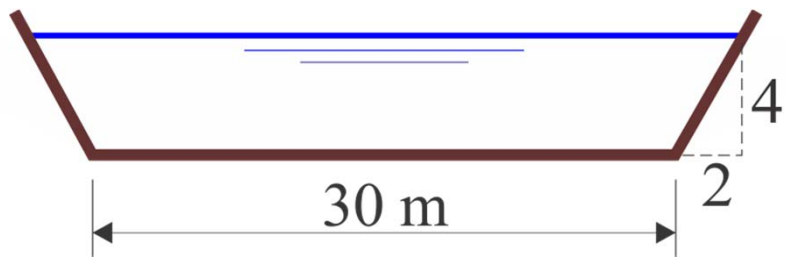
- $S_0 = 0.01 \%$
- $L = 30 \text{ m}$
- $p = 0.5$
- $n_w = 0.014$
- $d_{65} = 0.35 \text{ mm}$



# Relation hauteur-débit: influence des formes de fond

## Exemple:

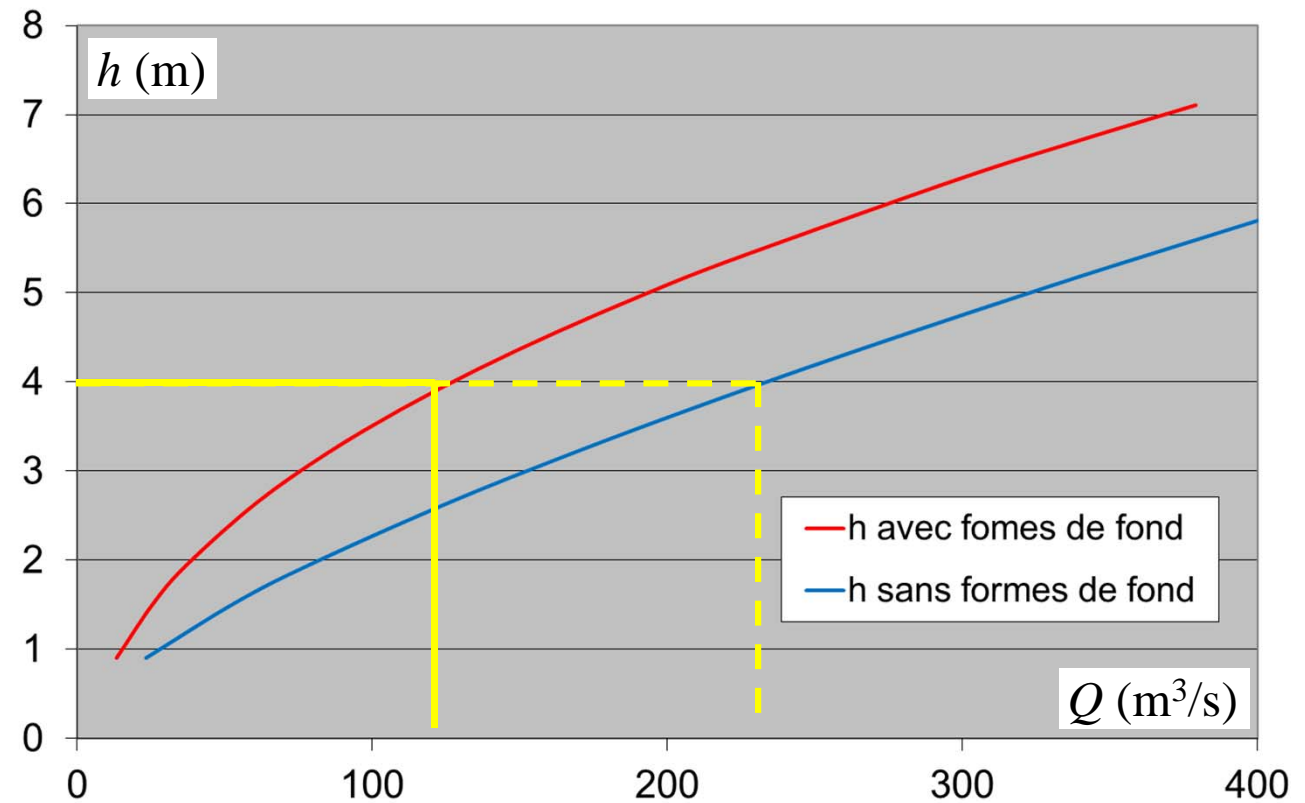
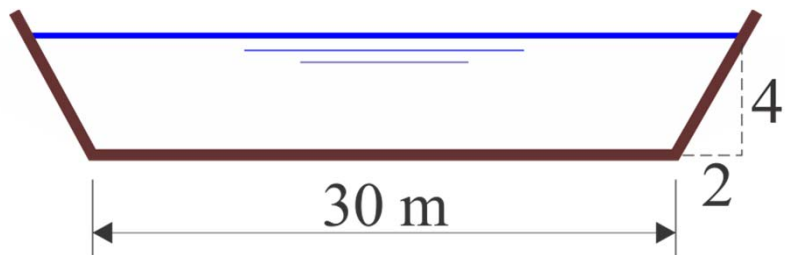
- $S_0 = 0.01 \%$
- $L = 30 \text{ m}$
- $p = 0.5$
- $n_w = 0.014$
- $d_{65} = 0.35 \text{ mm}$



# Relation hauteur-débit: influence des formes de fond

## Exemple:

- $S_0 = 0.01 \%$
- $L = 30 \text{ m}$
- $p = 0.5$
- $n_w = 0.014$
- $d_{65} = 0.35 \text{ mm}$





Sandra Soares-Frazão  
UCLouvain

## Charriage

1. Formes de fond

2. Rugosité

3. Relation  $Q-h$

4. Lois de transport

5. Applicabilité

# Transport solide par charriage

## Plan et objectif

### Formes de fond

- Définition et illustration

### Rugosité de grains et de forme

- Effet des formes de fond sur la rugosité
- Diagramme d'Engelund et Hansen

### Relation hauteur-débit

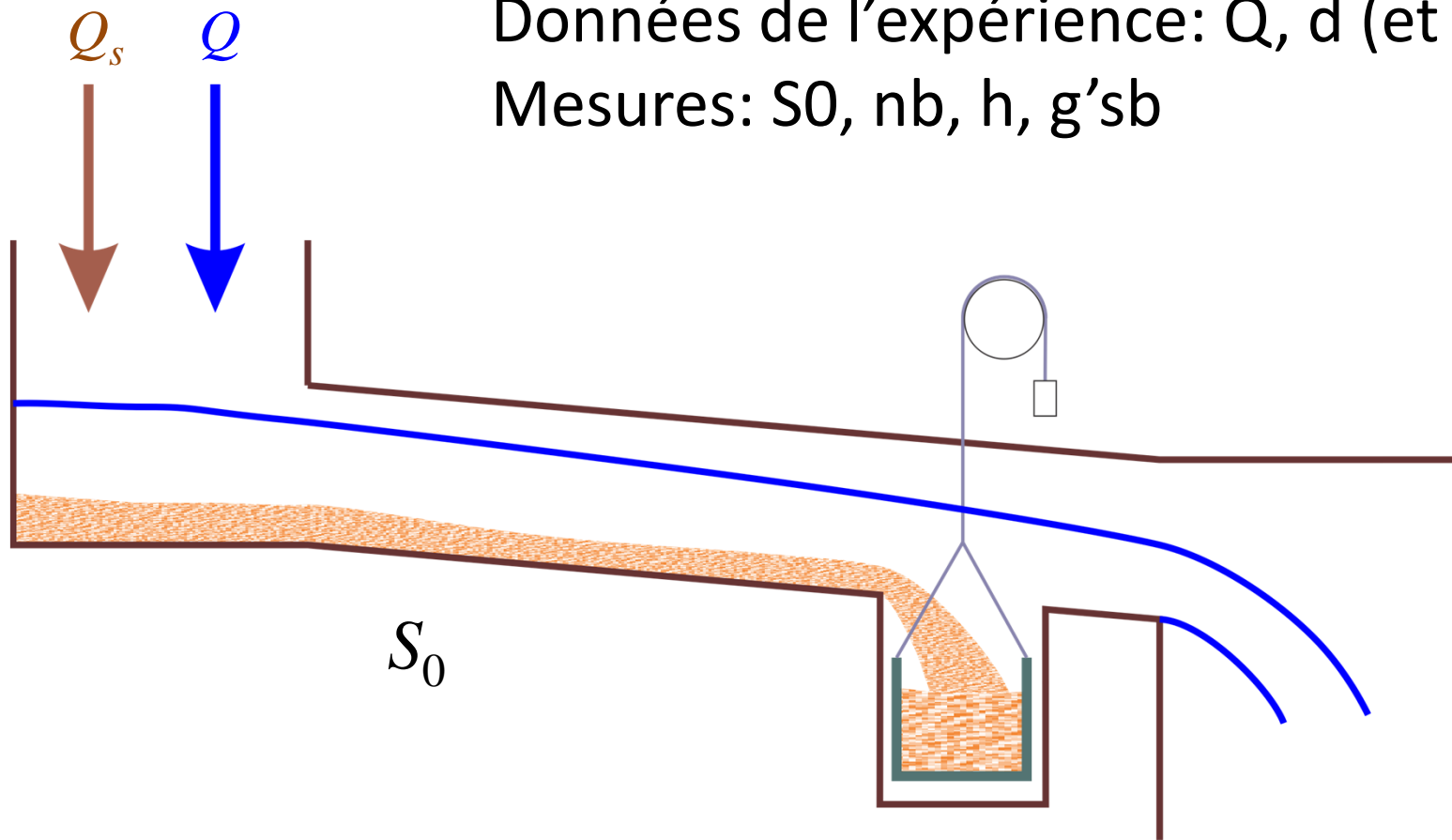
### Lois de transport

- Meyer-Peter & Müller
- Autres lois

### Conditions d'application des lois de transport

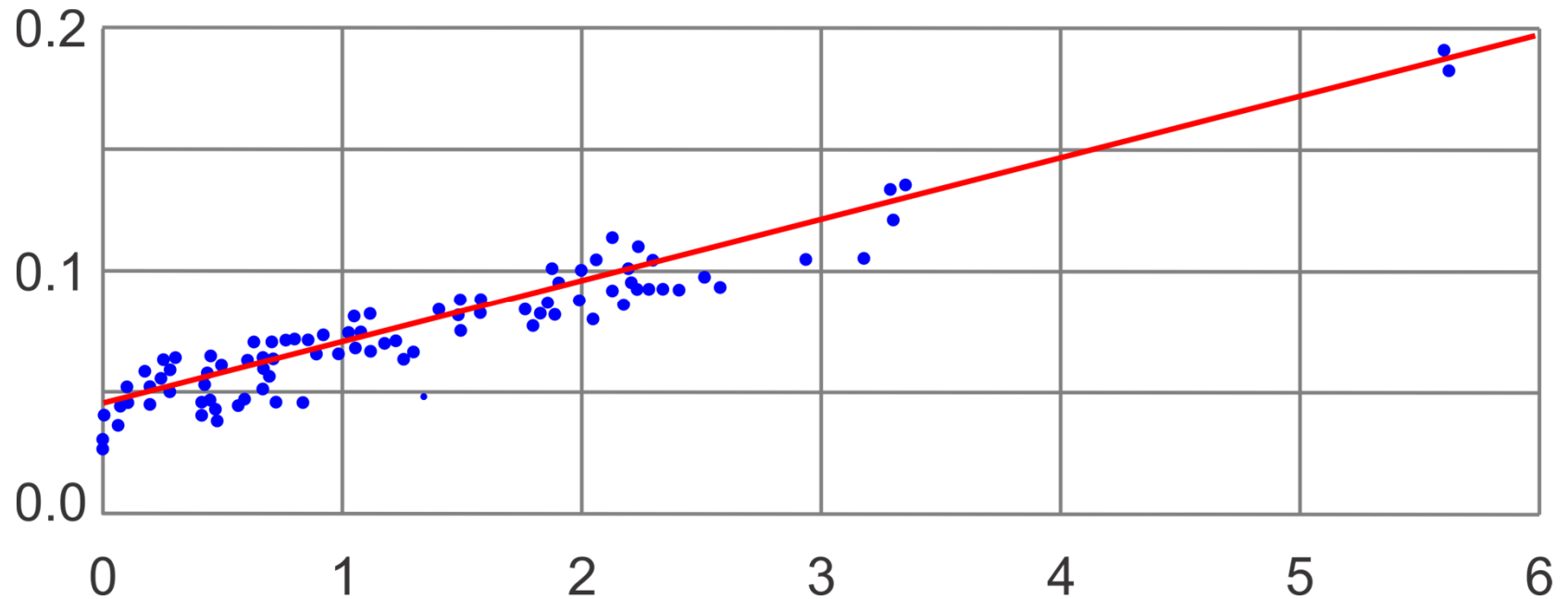
# Expérience de Meyer-Peter et Müller

Données de l'expérience:  $Q$ ,  $d$  (et donc  $n'$ )  
Mesures:  $S_0$ ,  $nb$ ,  $h$ ,  $g'sb$



# Expérience de Meyer-Peter et Müller

$$\frac{Q_b}{Q} \left( \frac{n_b'}{n_b} \right)^{3/2} \frac{\gamma h S_0}{(\gamma_s - \gamma) d} = \tau'_{*b}$$

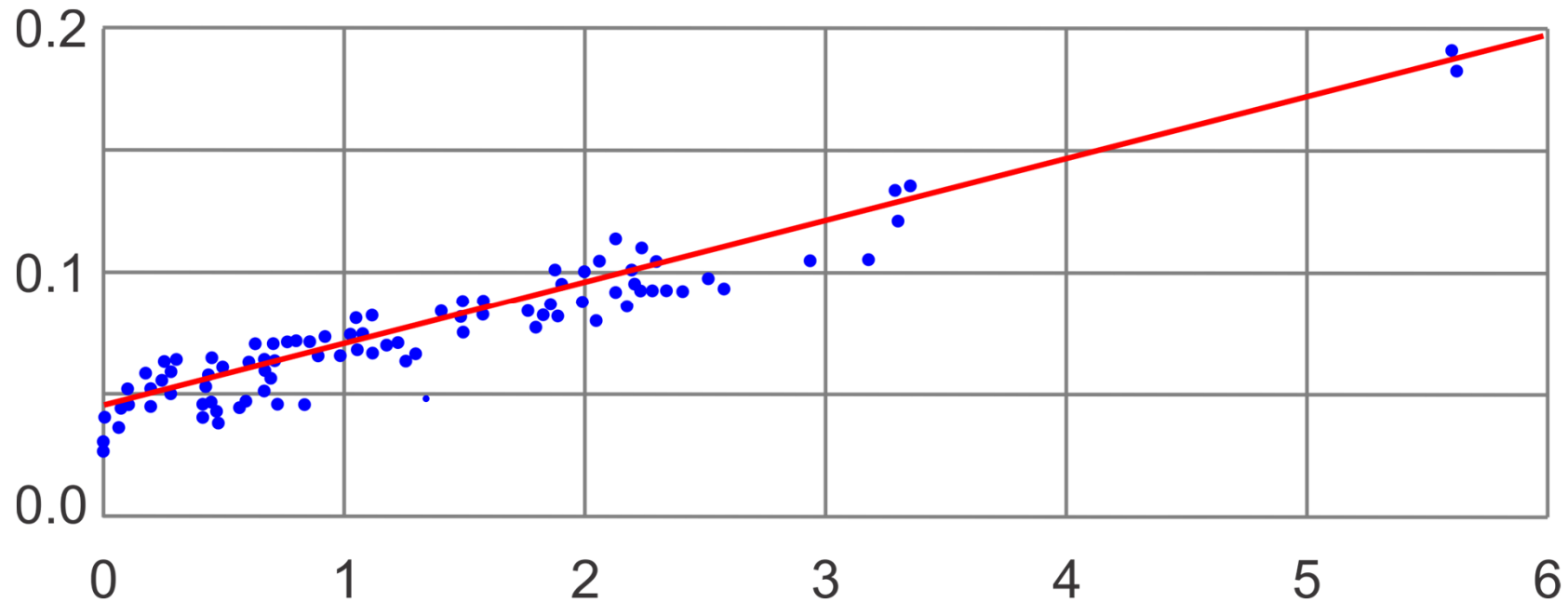


$$\frac{\rho^{1/3}}{\gamma_s - \gamma} \frac{(g_{sb}')^{2/3}}{d} = (q_{sb*})^{2/3}$$



# Expérience de Meyer-Peter et Müller

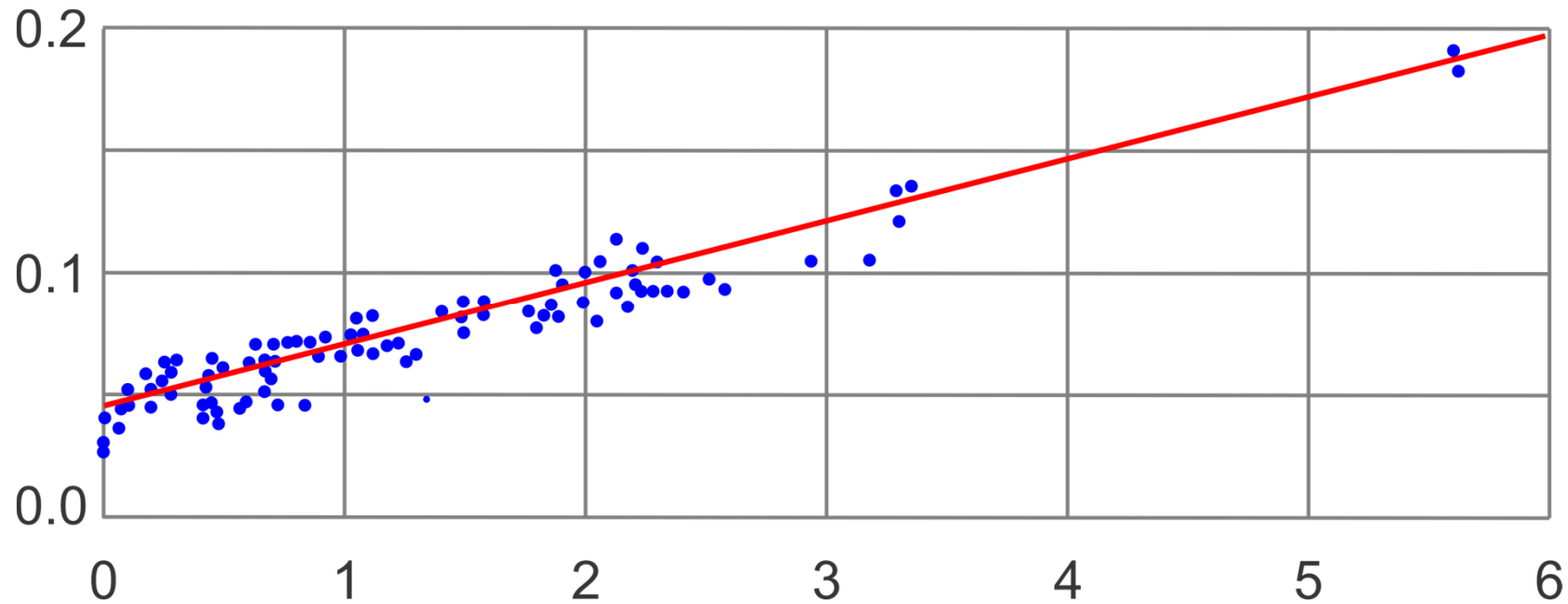
$$\frac{Q_b}{Q} \left( \frac{n_b'}{n_b} \right)^{3/2} \frac{\gamma h S_0}{(\gamma_s - \gamma) d} = \text{[blue box]}$$



$$\frac{\rho^{1/3}}{\gamma_s - \gamma} \frac{(g_{sb}')^{2/3}}{d} = \text{[blue box]}$$

# Expérience de Meyer-Peter et Müller

$$\frac{Q_b}{Q} \left( \frac{n_b'}{n_b} \right)^{3/2} \frac{\gamma h S_0}{(\gamma_s - \gamma) d} = \text{[blue box]}$$



$$\tau_{*b}' = 0.047 + 0.25 (q_{sb*})^{2/3}$$

$$\frac{\rho^{1/3}}{\gamma_s - \gamma} \frac{(g_{sb}')^{2/3}}{d} = \text{[blue box]}$$

# Formule de Meyer-Peter et Müller

Transport solide par unité de largeur

$$q_{sb*} = 8 (\tau_{*b}' - 0.047)^{3/2}$$

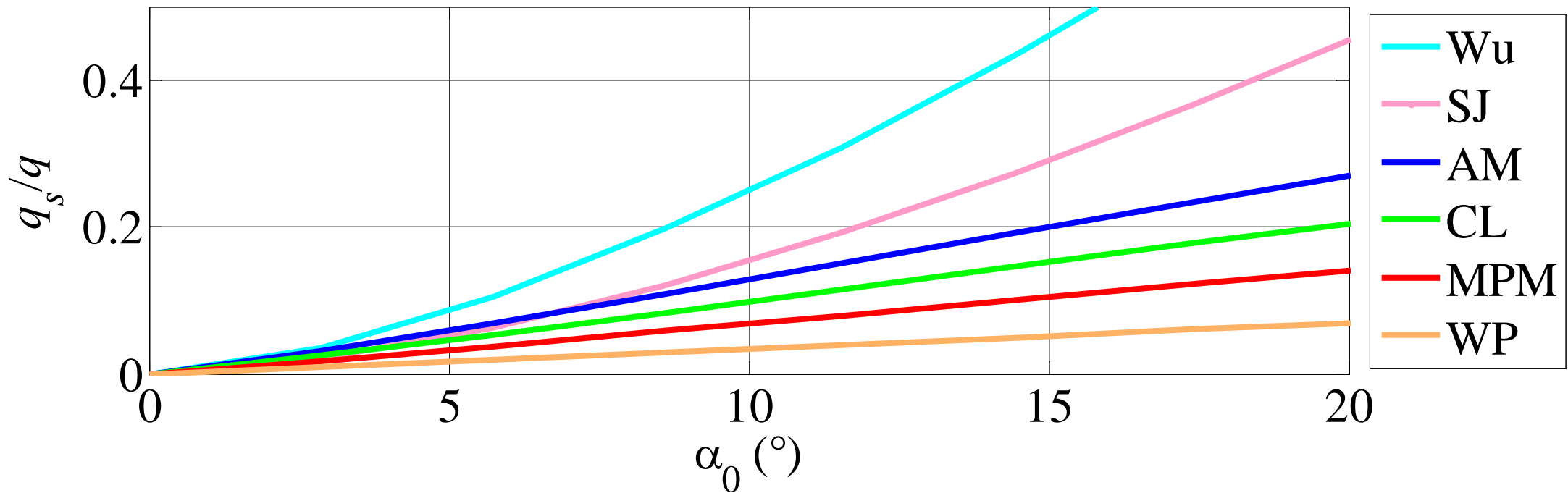
$$\frac{q_{sb}}{\sqrt{g(s-1)d^3}} = 8 \left[ \left( \frac{n_b'}{n_b} \right)^{3/2} \frac{\gamma R_b S_f}{(\gamma_s - \gamma) d} - 0.047 \right]^{3/2}$$

# Autres lois de transport solide par charriage

Références		Transport solide adimensionnel	$d$ (mm)
Meyer-Peter et Müller (1948)	MPM	$q_{*s} = 3.97(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5}$	0.4-29
Wong et Parker (2006)	WP	$q_{*s} = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5}$	0.4-29
Wu et al. (2000)	Wu	$q_{*s} = 0.0053 \left( \left( \frac{n'}{n} \right)^{1.5} \left( \frac{\tau_*}{\tau_{*c}} \right) - 1 \right)^{2.2}$	0.06-128
Smart et Jäggi (1983)	SJ	$q_{*s} = 4.2 \left( \frac{u}{u_*} \right) S_f^{0.6} \tau_*^{0.5} (\tau_* - \tau_{*c}(\alpha_0))$	0.4-29
Camenen et Larson (2005)	CL	$q_{*s} = 12 \tau_*^{1.5} \exp\left(-4.5 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)$	0.08-200
Ashida et Michiue (1972)	AM	$q_{*s} = 17 (\tau_* - \tau_{*c}) \left( (\tau_*)^{1/2} - (\tau_{*c})^{1/2} \right)$	0.3-7

# Autres lois de transport solide par charriage

Variabilité des résultats à partir de différentes formules:  
Transport solide en fonction de la pente de fond





Sandra Soares-Frazão  
UCLouvain

## Charriage

1. Formes de fond

2. Rugosité

3. Relation  $Q-h$

4. Lois de transport

5. Applicabilité

# Transport solide par charriage

## Plan et objectif

### Formes de fond

- Définition et illustration

### Rugosité de grains et de forme

- Effet des formes de fond sur la rugosité
- Diagramme d'Engelund et Hansen

### Relation hauteur-débit

### Lois de transport

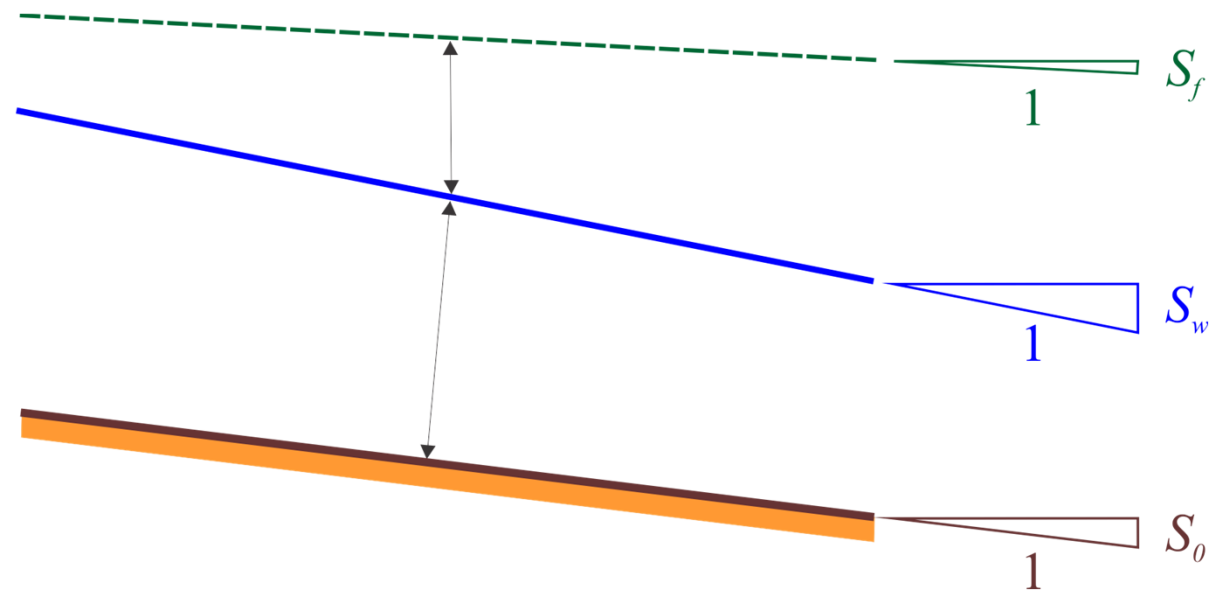
- Meyer-Peter & Müller
- Autres lois

### Conditions d'application des lois de transport

# Conditions d'application des lois de transport

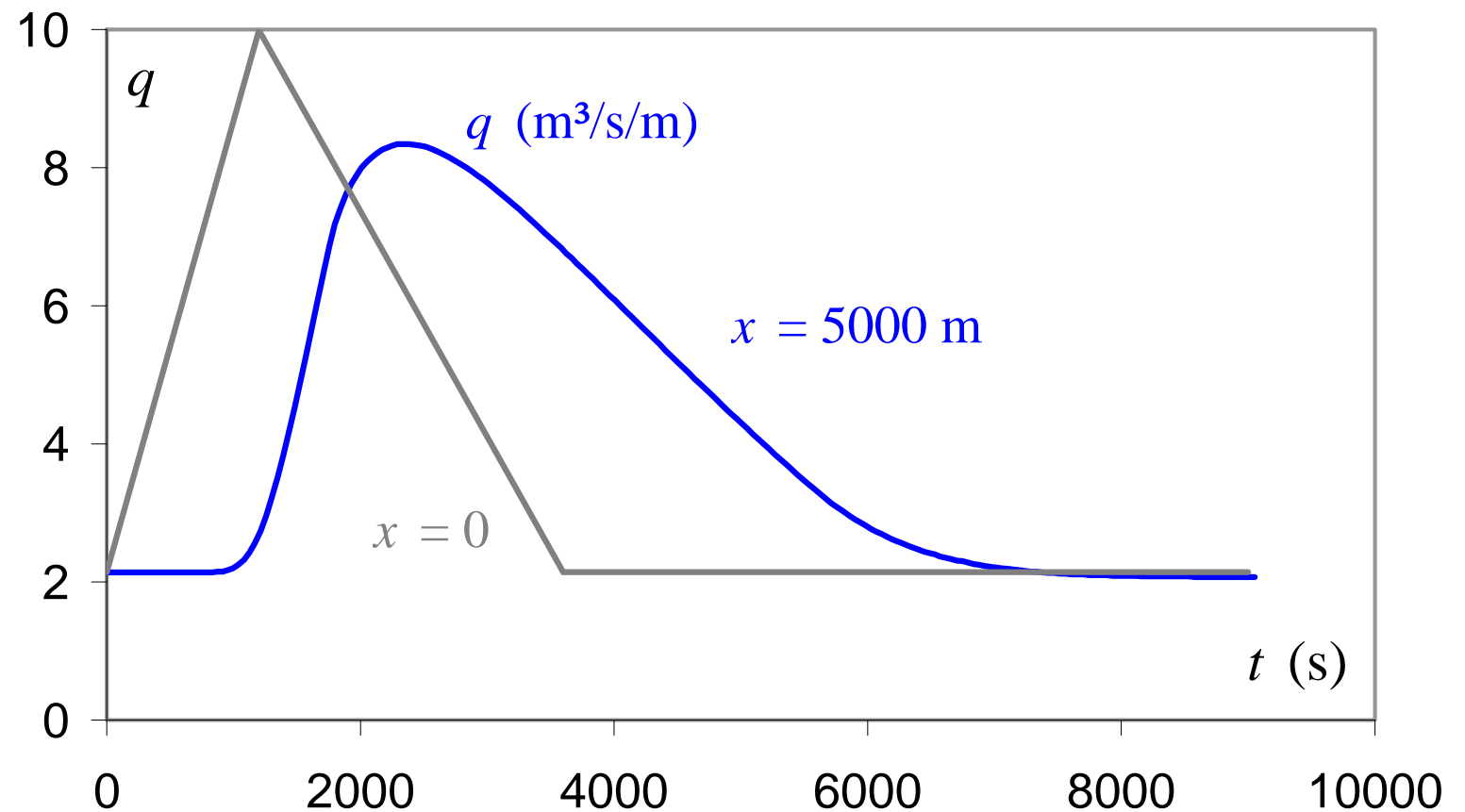
Quelle pente choisir pour exprimer  $\tau_0$  ?

- Pente de fond  $\tau_0 = \gamma R S_0$
- Pente de la surface libre  $\tau_0 = \gamma R S_w$
- Pente de la ligne de charge  $\tau_0 = \gamma R S_f$



# Conditions d'application des lois de transport

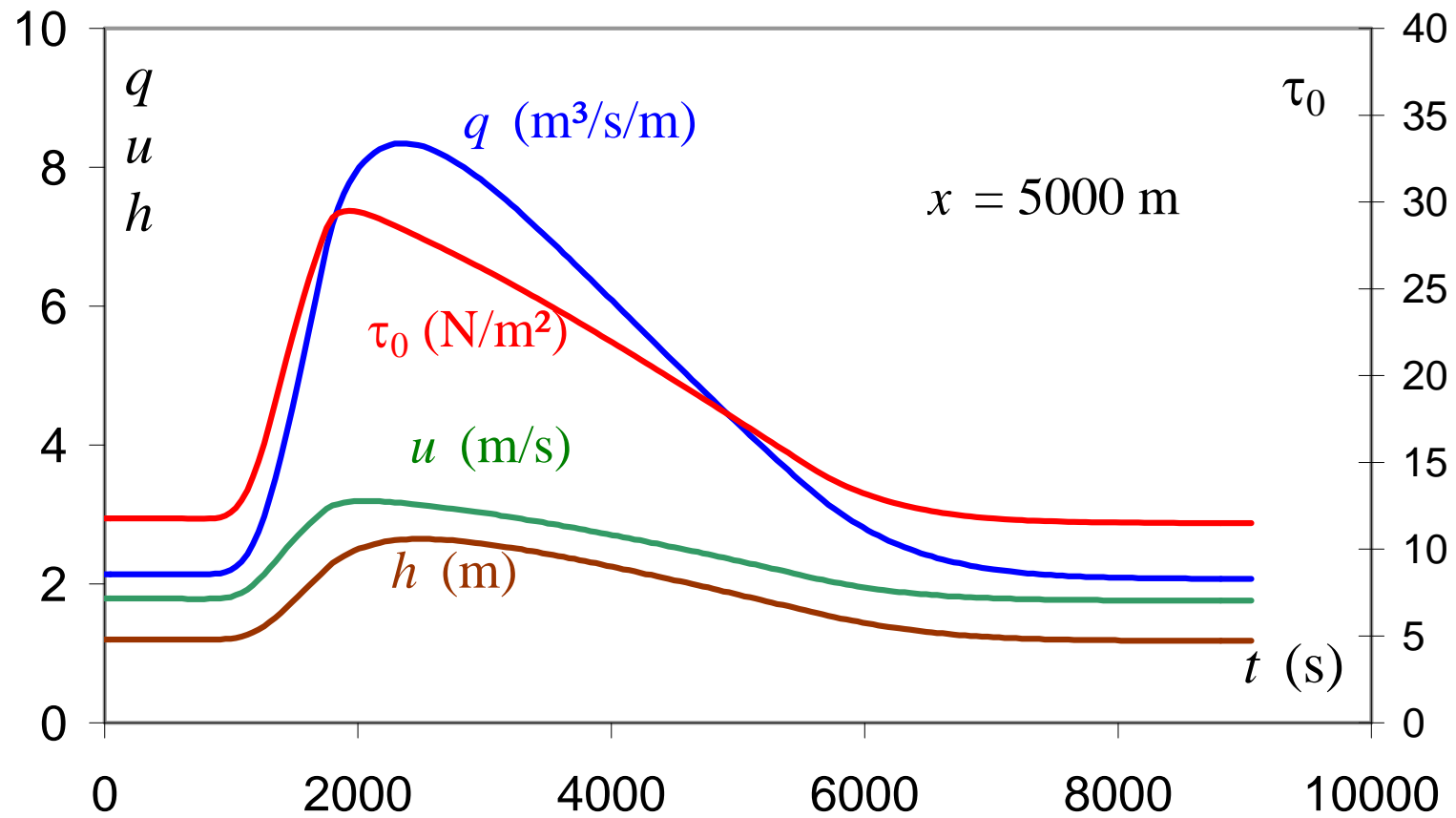
Le transport solide est-il en équilibre à tout moment ?





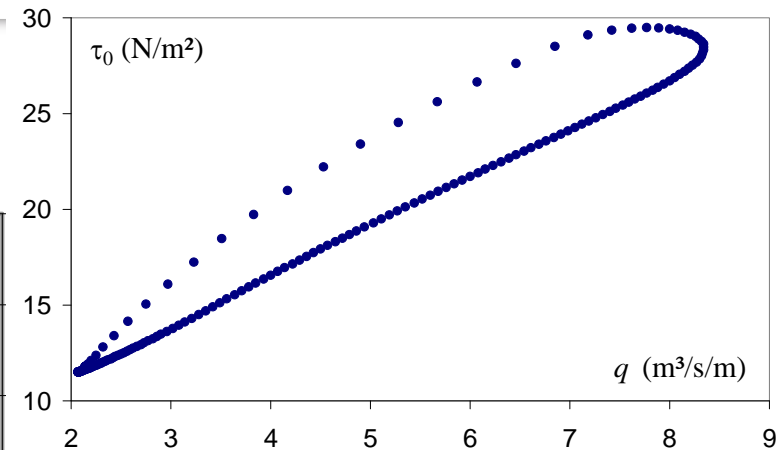
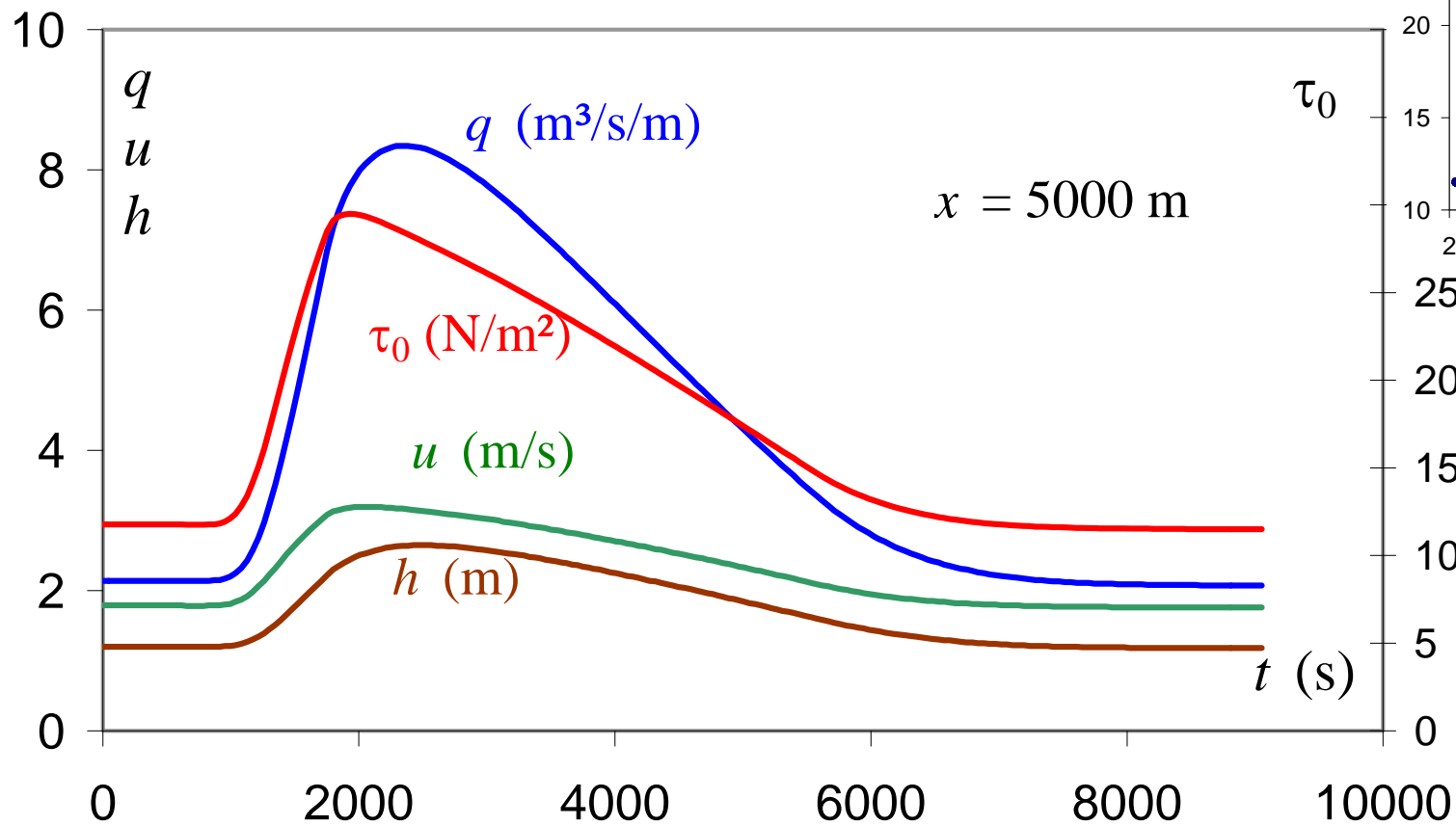
# Conditions d'application des lois de transport

## Hystérésis de la force tractrice



# Conditions d'application des lois de transport

## Hystérésis de la force tractrice



# Conditions d'application des lois de transport

Quelle est l'influence de la distribution granulométrique?



Lit initial  
 $d_{50} = 14.5 \text{ mm}$   
 $\sigma = 3.2$

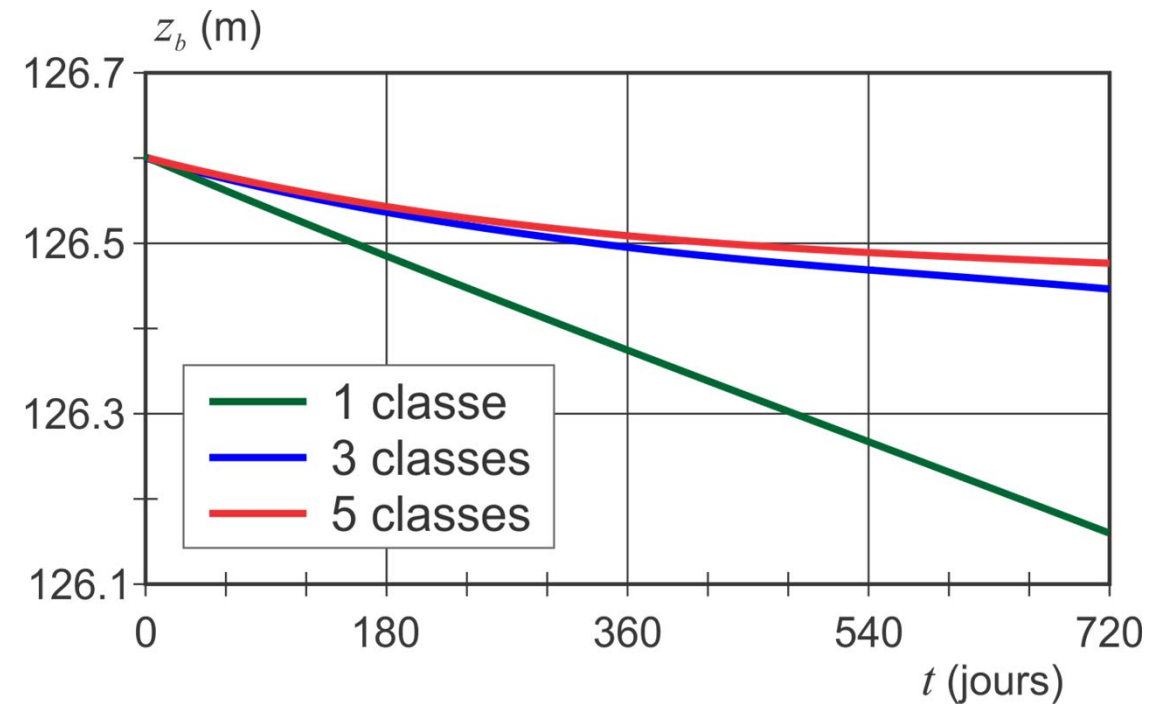
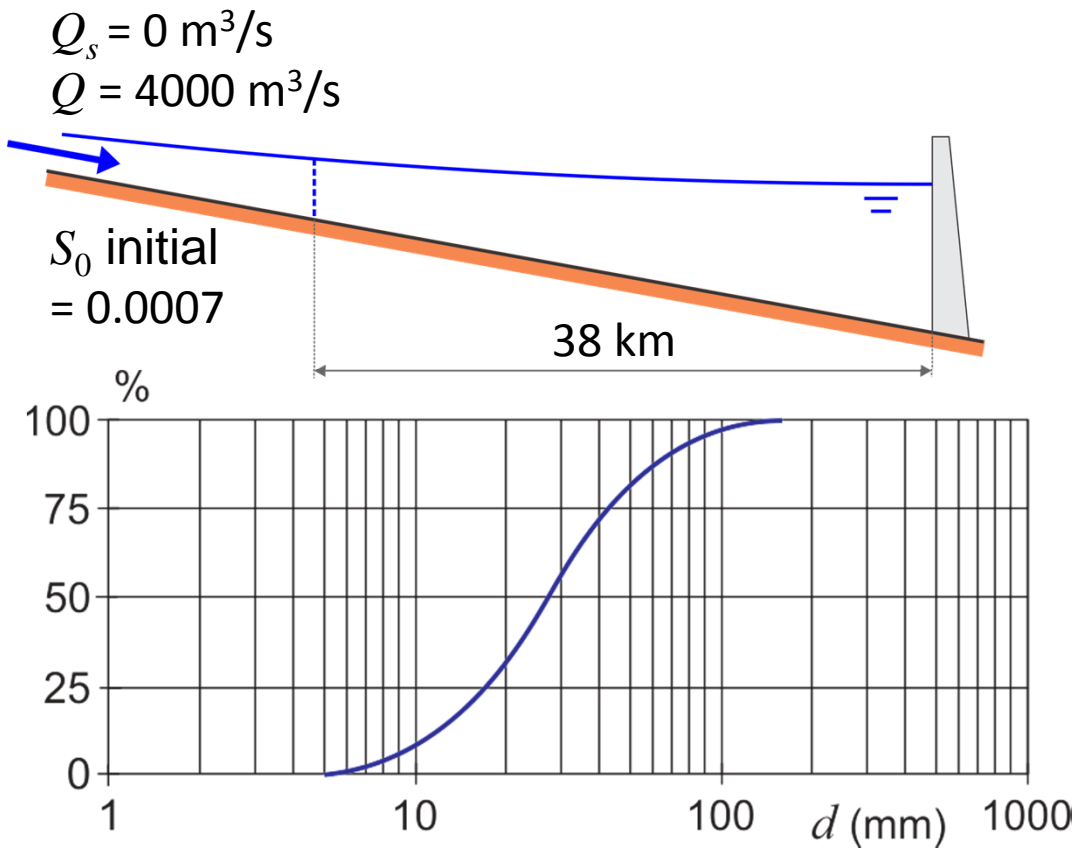


Lit final  
 $d_{50} = 23.0 \text{ mm}$   
 $\sigma = 1.5$

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$$

# Conditions d'application des lois de transport

Quelle est l'influence de la distribution granulométrique?





Sandra Soares-Frazão  
UCLouvain

Charriage



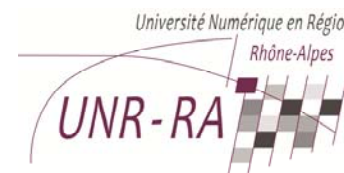
# Des rivières et des hommes



## Réalisation



## Avec le soutien de



# Crédits photo

---

Le Rhône valaisan : **Sandra Soares-Frazão**

Les dunes en canal d'essai : **Quentin Fraselle**

Dunes et antidunes en canal d'essai : **Yves Zech**

Les exemples de distribution granulométrique : **Katinka Koll**

# Réalisation multimédia

---



PerForm - Grenoble INP



Service TICE-EAD de l' Université Pierre-Mendès-France, Grenoble 2