

MATERIAUX GRANULAIRES DU GENIE CIVIL :

- *AVANCEES RECENTES
DANS LA PHYSIQUE DE LEUR COMPORTEMENT*
- *APPLICATIONS PRATIQUES AUX OUVRAGES*

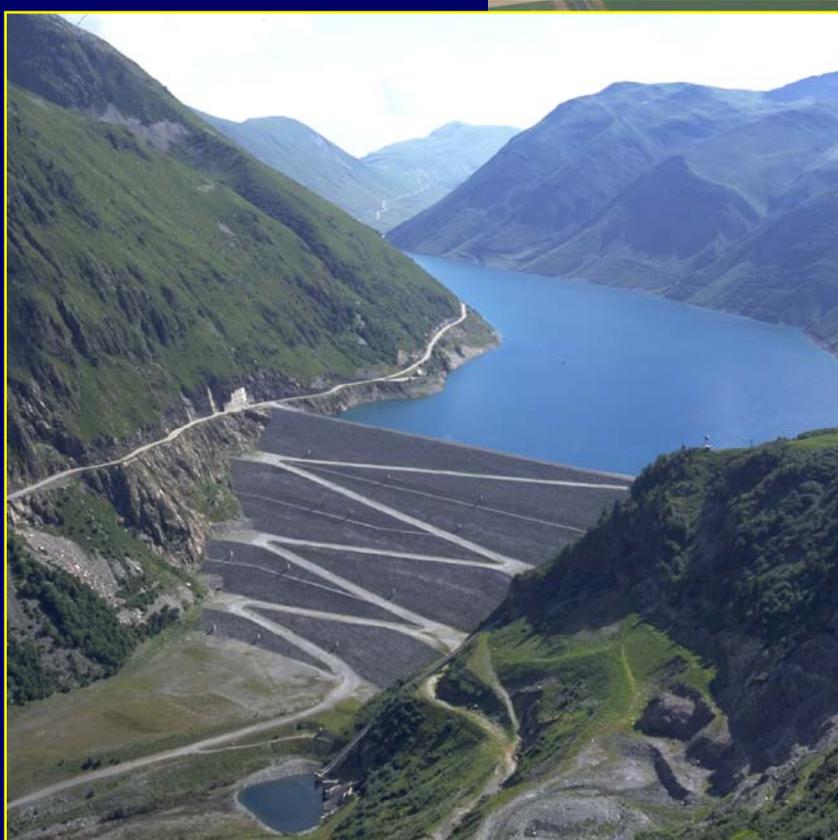
Introduction-Contexte

- 1- Dissipation d'énergie par Friction intergranulaire
- 2- Effets d'échelle dus aux Rupture des granulats

Conclusions

Introduction -Contexte

Tendance: recherche d'économies croissantes sur des ouvrages de plus en plus grands - *ouvrages linéaires de Transport (ferroviaires, autoroutiers), Travaux Maritimes*
- *Barrages en Enrochements*



Introduction-Contexte: passage micro-macro ?



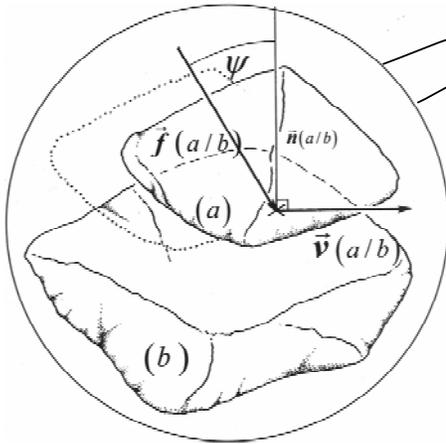
CFMS –Paris- 12 Mars 2008

... des approches spécifiques...

1- Dissipation d'énergie par friction

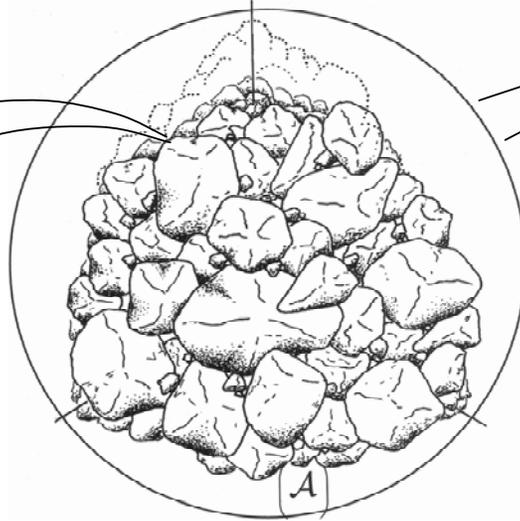
a) Contact élémentaire

$$\mathbf{p}(c) = \frac{1}{2} \{ \mathbf{v} \otimes \mathbf{f} + \mathbf{f} \otimes \mathbf{v} \}$$



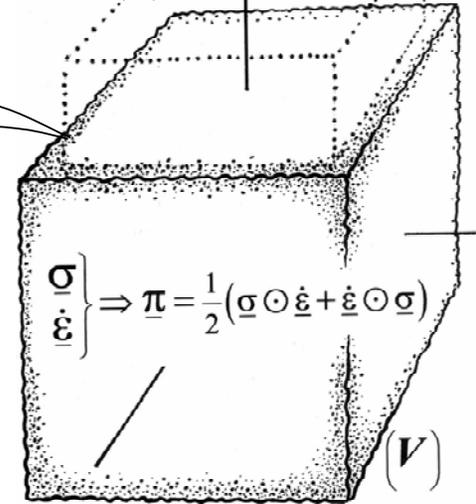
b) Amas granulaire discontinu

$$\mathbf{P}(A) = \sum_A \mathbf{p}(c)$$



c) Continuum Equivalent

$$\bar{\pi} = \frac{1}{V(A)} \cdot \int_V \pi dv = \frac{1}{V(A)} \cdot \mathbf{P}(A)$$



Le concept des Actions Intérieures

...une nouvelle écriture des lois de la friction...

1- Dissipation d'énergie par friction

CONTACT ELEMENTAIRE

- Effort de contact, vitesse de glissement

→ Dissipation par friction: $\vec{f} \cdot \vec{v} = \sin \psi \cdot \|\vec{f}\| \cdot \|\vec{v}\|$

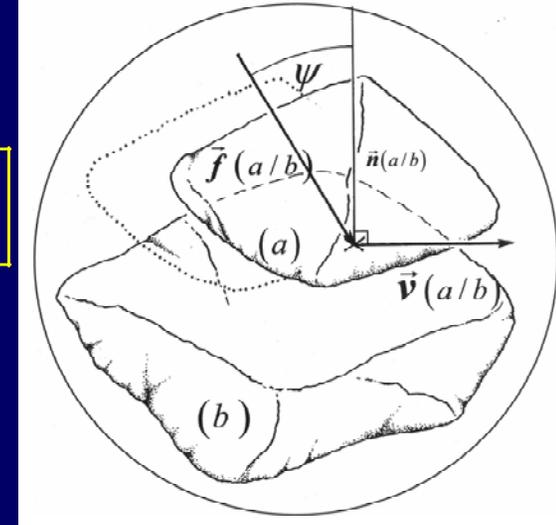
- Actions de contact $\mathbf{p}(c)$: $p_{ij} = \frac{1}{2} (v_i \cdot f_j + f_i \cdot v_j)$

$Trace\{\mathbf{p}(c)\} = \vec{f} \cdot \vec{v}$ puissance
développée par l'effort de contact

$$\sum |p_i| = N\{\mathbf{p}(c)\} = \|\vec{f}\| \cdot \|\vec{v}\|$$

→ Dissipation par friction: $Trace\{\mathbf{p}(c)\} = \sin \psi \cdot N\{\mathbf{p}(c)\}$

$$\mathbf{p}(c) = \frac{1}{2} \left\{ \vec{v} \otimes \vec{f} + \vec{f} \otimes \vec{v} \right\}$$



1- Dissipation d'énergie par friction

CONTACT ELEMENTAIRE

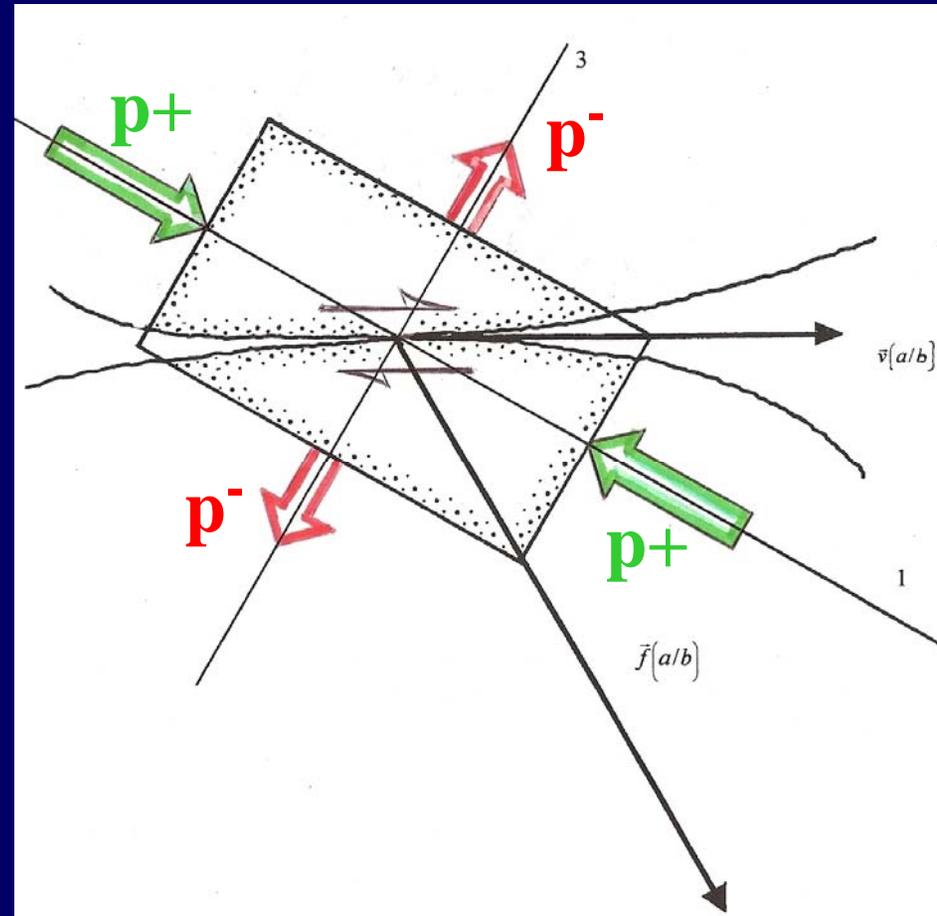
Actions de contact:

« Puissance Reçue » \mathbf{p}^+

« Puissance Rendue » \mathbf{p}^-

$$\begin{cases} \mathbf{p}^+ = \frac{1}{2} [Tr \{ \mathbf{p}(c) \} + N \{ \mathbf{p}(c) \}] \\ \mathbf{p}^- = \frac{1}{2} [Tr \{ \mathbf{p}(c) \} - N \{ \mathbf{p}(c) \}] \end{cases}$$

$$\frac{\mathbf{p}^+}{\mathbf{p}^-} = -\frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} = -\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2} \right)$$



1- Dissipation d'énergie par friction

AMAS GRANULAIRE DISCONTINU

Mouvement des contacts élémentaires

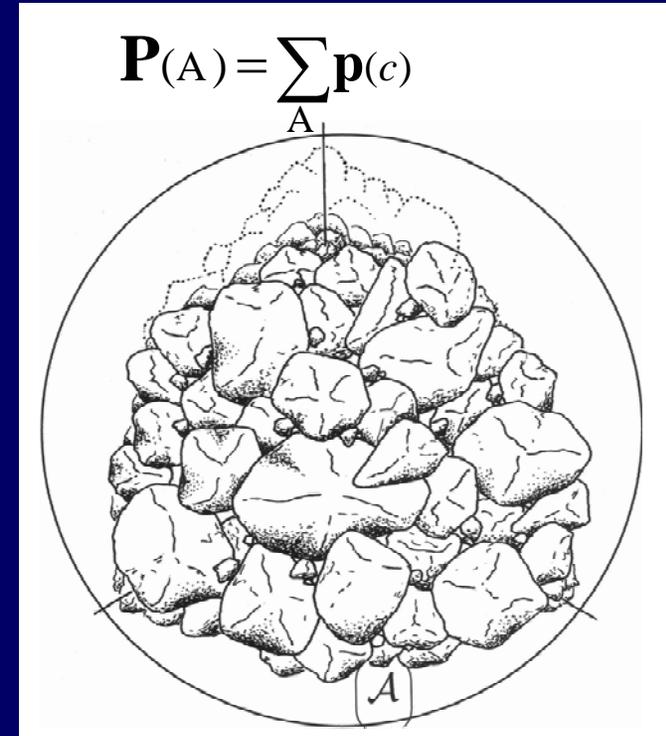
→ Dissipation par friction

$$\sum_A \vec{f} \cdot \vec{v} = \sin \psi \cdot \sum_A \|\vec{f}\| \cdot \|\vec{v}\|$$

puissance des efforts intérieurs

$$\sum_A \vec{f} \cdot \vec{v} = \sum_A \text{Tr}\{\mathbf{p}(c)\} = \text{Tr}\left\{\sum_A \mathbf{p}(c)\right\}$$

→ Actions intérieures de l'amas $\sum_A \mathbf{p}(c) = \mathbf{P}(A)$



1- Dissipation d'énergie par friction

AMAS GRANULAIRE DISCONTINU

→ Population de contacts élémentaires (distribution statistique d'actions de contact)

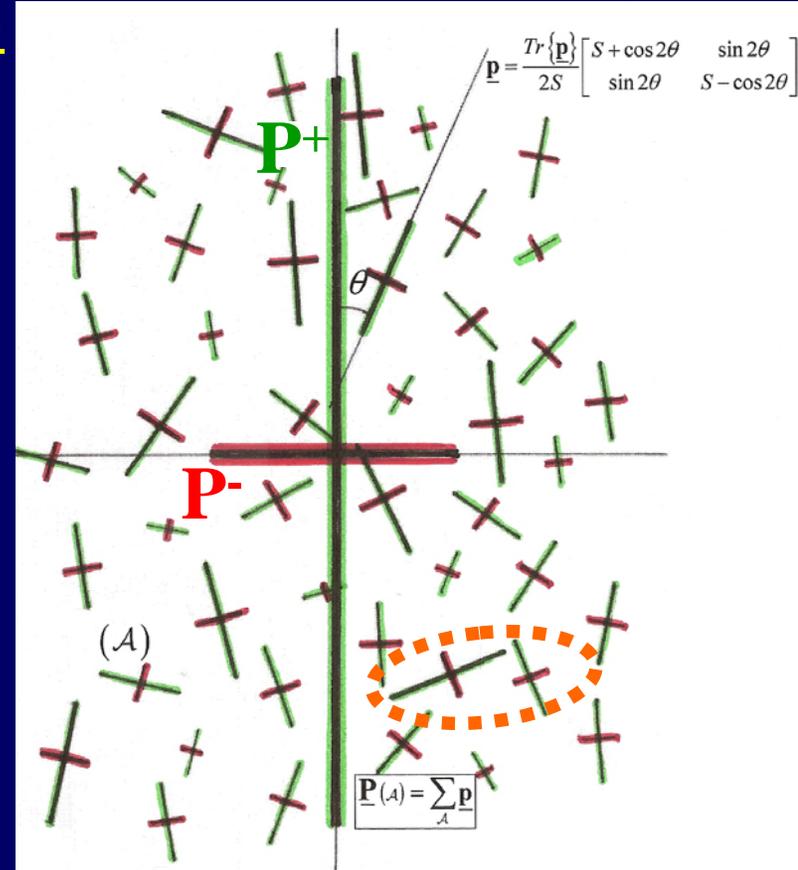
→ échanges d'énergie entre contacts voisins

$$\begin{cases} \mathbf{P}^+ = \sum \mathbf{p}^+ + R \sum \mathbf{p}^- \\ \mathbf{P}^- = (1-R) \sum \mathbf{p}^- \end{cases}$$

R Taux de réalimentation interne

$$0 \leq R_{(A)} \leq 1$$

$$R_{(A)} = \frac{1}{(1 - \sin \psi)} \left[1 - \frac{N \left\{ \sum_A \mathbf{p} \right\}}{\sum_A N \{ \mathbf{p} \}} \right]$$



1- Dissipation d'énergie par friction

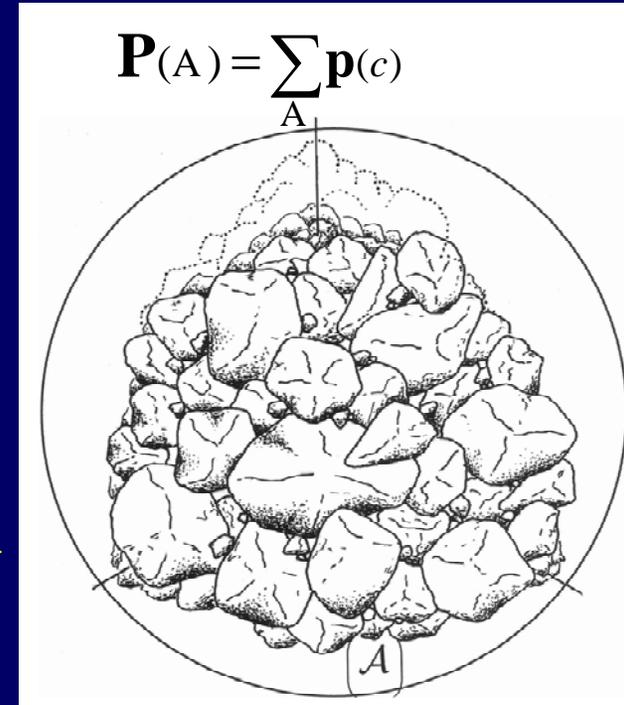
AMAS GRANULAIRE DISCONTINU

→ Dissipation par friction, avec effet de réalimentation interne

$$Tr\{\mathbf{P}(A)\} = \frac{\sin \psi}{1 - R(A) \cdot (1 - \sin \psi)} \cdot N\{\mathbf{P}(A)\}$$

«friction apparente» $\sin \psi^* = \frac{\sin \psi}{1 - R(A) \cdot (1 - \sin \psi)}$

$$Tr\{\mathbf{P}(A)\} = \sin \psi^* \cdot N\{\mathbf{P}(A)\}$$



$$\frac{\mathbf{P}^+(A)}{\mathbf{P}^-(A)} = -\tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi^*}{2}\right)$$

1- Dissipation d'énergie par friction

AMAS GRANULAIRE :

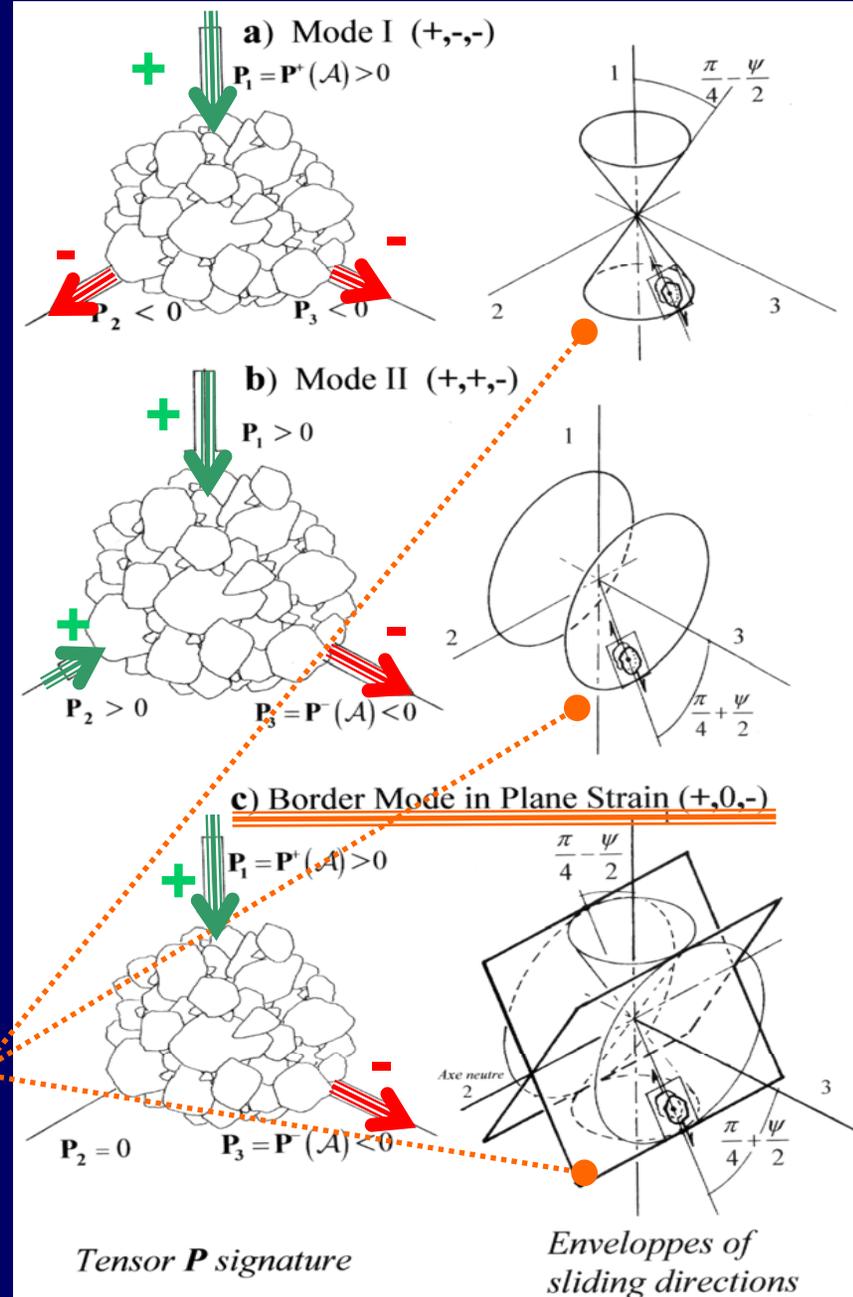
Thermodynamique
phénoménologique des systèmes
dissipatifs (Théor. de Prigogine)

→ Règle de Moindre Dissipation

→ Rôle asymptotique des

Modes de dissipation minimale (avec $R=0$)

- polarisation des actions de contact
=> orientation des contacts actifs
- similitude interne



1- Dissipation d'énergie par friction

MILIEU CONTINU EQUIVALENT

Contraintes, vitesses de déformations $\underline{\sigma}$, $\underline{\dot{\epsilon}}$

→ Actions intérieures du milieu continu

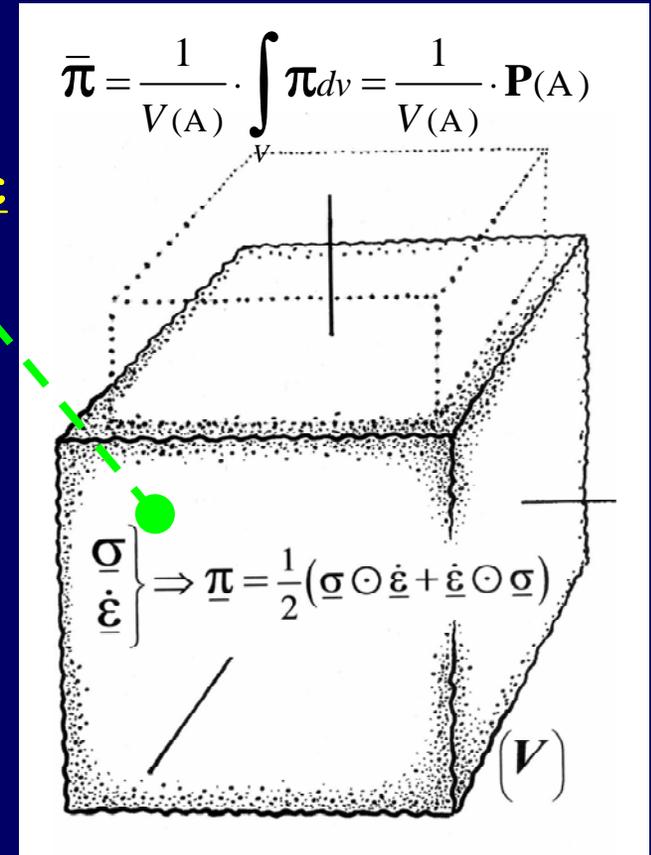
Vérifie $Tr\{\underline{\pi}\} = \sum_{ij} \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$ puissance des efforts intérieurs

-Identification énergétique avec l'amas granulaire → Relation de la dissipation par friction

$$Tr\{\underline{\pi}\} = \sin \psi^* \cdot N\{\underline{\pi}\}$$

-Coaxialité entre $\underline{\sigma}$, $\underline{\dot{\epsilon}}$
repère propre →

$$\sum_i \sigma_i \dot{\epsilon}_i = \sin \psi^* \cdot \sum_i |\sigma_i \dot{\epsilon}_i|$$



1- Dissipation d'énergie par friction

Milieu continu équivalent - Conséquences macroscopiques

Conséquences *explicites* → *un large ensemble de propriétés:*

$$\sum_i \sigma_i \dot{\epsilon}_i = \sin \psi^* \cdot \sum_i |\sigma_i \dot{\epsilon}_i|$$

-i) large compatibilité avec l'hétérogénéité en contraintes et déformations → *raisonnement sur les grandeurs moyennes, analyse de la localisation*

-ii) « domaine caractéristique » autour des états de contraintes isotropes, dans lequel toute déformation entraîne une contraction en volume (compactage sous mouvements alternés, liquéfaction, ..)



1- Dissipation d'énergie par friction

Milieu continu équivalent - Conséquences macroscopiques

Conséquences *explicites* → un large ensemble de propriétés:

$$\sum_i \sigma_i \dot{\epsilon}_i = \sin \psi^* \cdot \sum_i |\sigma_i \dot{\epsilon}_i|$$

-iii) à volume variable, sous contraintes axisymétriques ou déformation plane → obtention des « Relations Contraintes-Dilatance » de Rowe :

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \left(1 - \frac{\dot{\epsilon}_v}{\dot{\epsilon}_1} \right) \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi^*}{2} \right)$$

-iv) « état critique » → présence d'un Critère de Rupture, précisément le Critère de Coulomb:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi^*}{2} \right)$$

1- Dissipation d'énergie par friction

Nombreuses confirmations expérimentales

- sollicitations axisymétriques en contraintes: appareil triaxial classique (Barden 1966, Frossard 1978, Charles & Watts 1980,...)
- sollicitations en déformation plane: appareil biaxial (Barden 1969,...), appareil de cisaillement simple Cambridge - déformation plane avec rotation d'axes- (SSA-Stroud 1977)
- sollicitations tridimensionnelles: presse tridimensionnelle de Grenoble - déformations cycliques 3D de grande amplitude - (Lanier 1984)

1- Dissipation d'énergie par friction

HETEROGENEITE- LOCALISATION

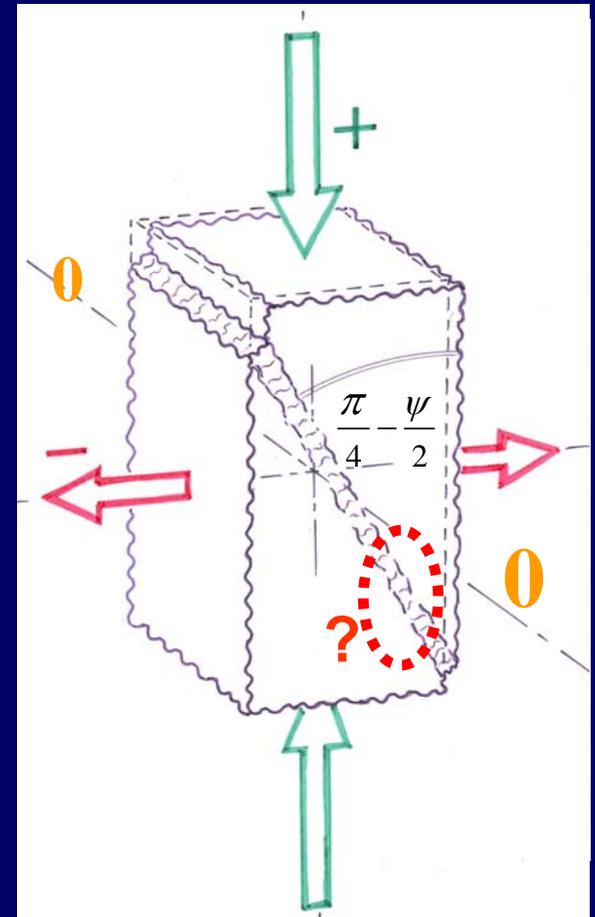
Mouvement hétérogène admissible, s'amorçant naturellement par fluctuations, qui s'amplifient au cours du mouvement.

Actions intérieures

→ recherche de solutions localisées en régime établi, configuration d'ensemble:

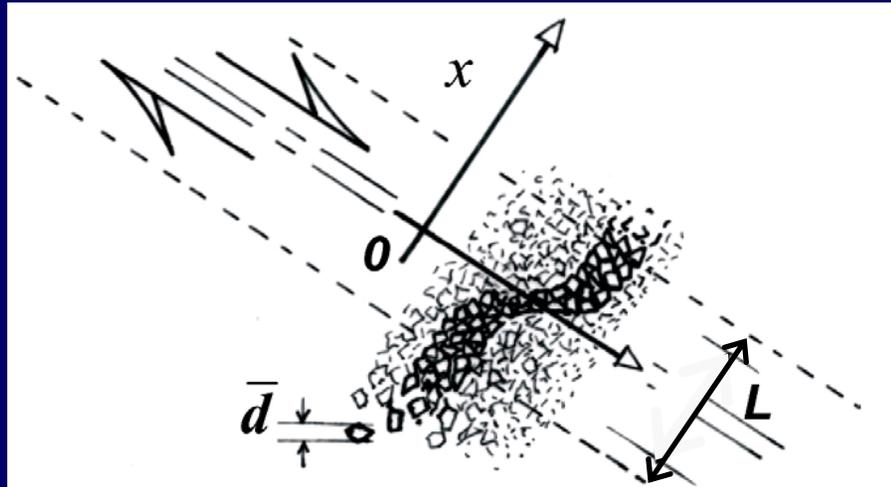
- le mouvement tend vers du cisaillement en déformation plane..

-...inclinaison à environ $\frac{\pi}{4} - \frac{\psi}{2}$ par rapport à la direction principale majeure (**P+**)



1- Dissipation d'énergie par friction

HETEROGENEITE LOCALISATION



Bande de cisaillement stationnaire

- analyse cinématique

→ profil exponentiel..

$$\dot{\gamma}(x) = \dot{\gamma}_{Max} \cdot \exp\{-k|x|\} + \dot{\gamma}_{lim}$$

- pour un cisaillement moyen $\bar{\dot{\gamma}}$ imposé sur la largeur L , valeur relative du maximum dans l'axe :

$$Max \left\{ \left(\frac{\dot{\gamma}_{Max}}{\bar{\dot{\gamma}}} \right) (t) \right\} \approx \frac{kL}{2}$$

- valeur explicite du coefficient matériel k

$$k \approx \frac{1}{5\bar{d}} \cdot Ln2 \left\{ \frac{1 + \sin \psi}{R(1 - \sin \psi)} - 1 \right\}$$

1- Dissipation d'énergie par friction

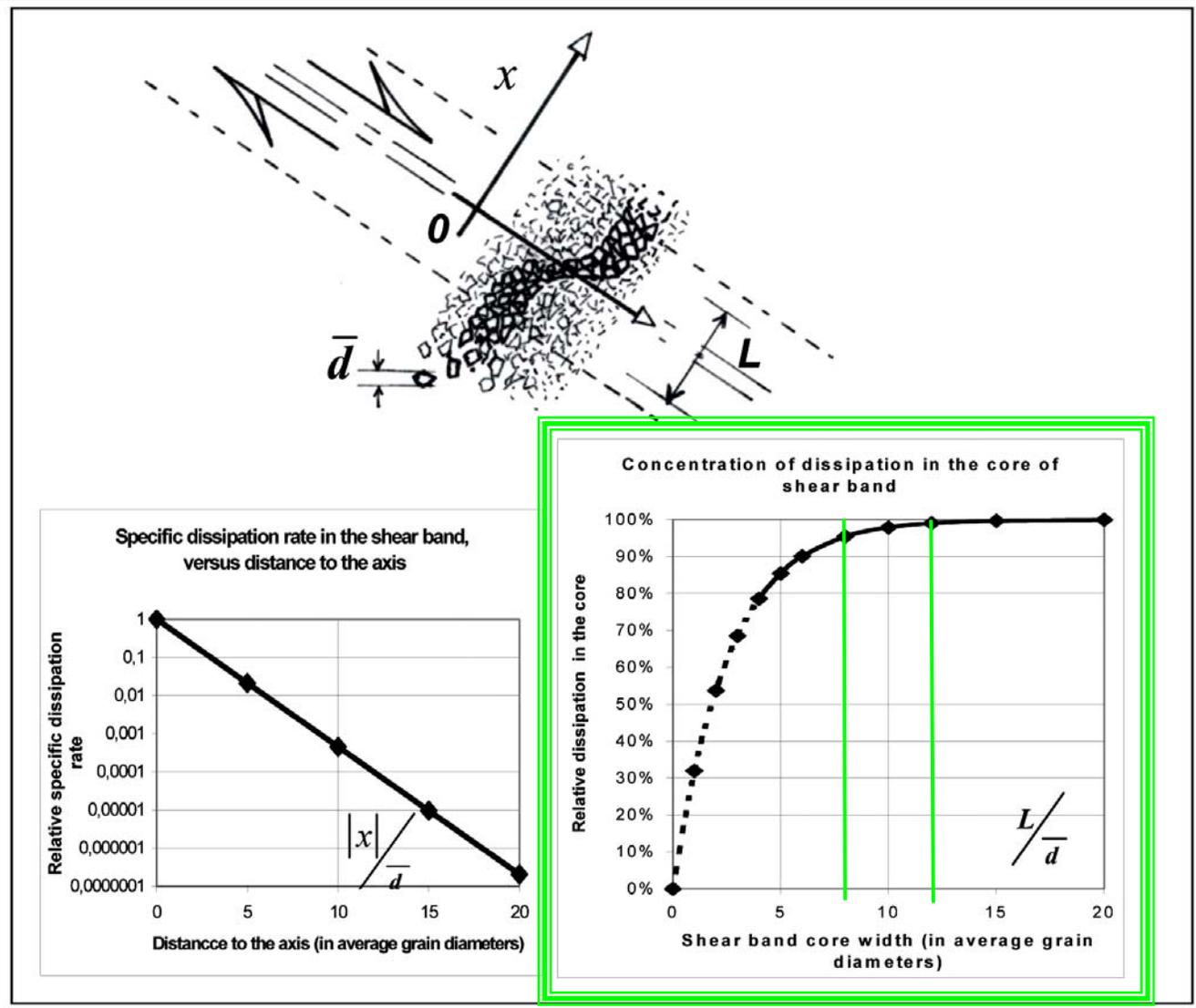
HETEROGENEITE

LOCALISATION

Bande de cisaillement stationnaire:

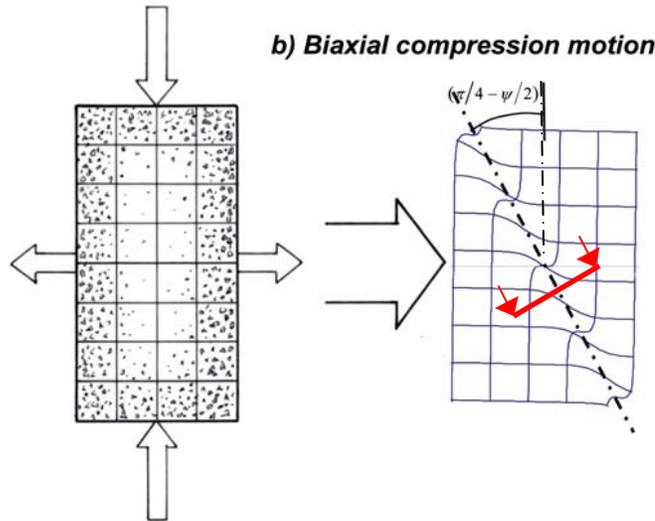
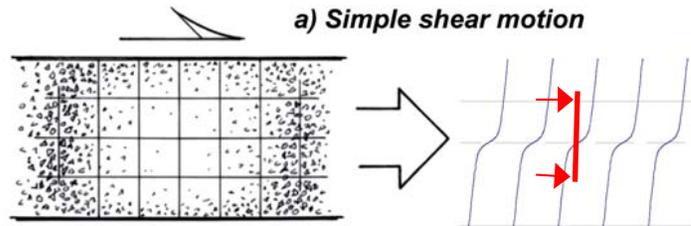
- profil exponentiel
- structure dissipative
- largeur effective à 99%:

$$12\bar{d}$$

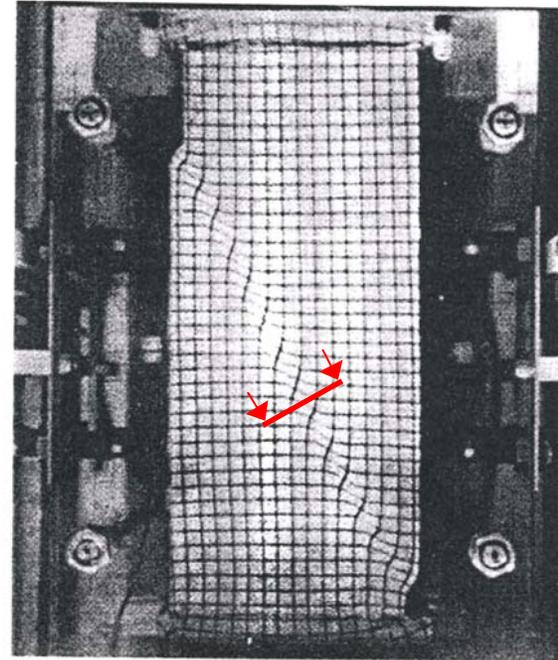


1- Dissipation d'énergie par friction – *Confirmations expérimentales*

Hétérogénéité - Localisation: Figures de déformation



Theoretical strain patterns corresponding to the steady shear band structure.



Shear Band in Plane Strain Compression Test (Ticino Sand: $D_r = 79\%$, $D_{50} = 0.527$ mm at $\sigma_3 = 78$ kPa and $\gamma_{max} = 13.3\%$)
(Photo Courtesy of Prof. F. Tatsuoka, University of Tokyo, Japan)

Experimental strain pattern with shear band in biaxial compression

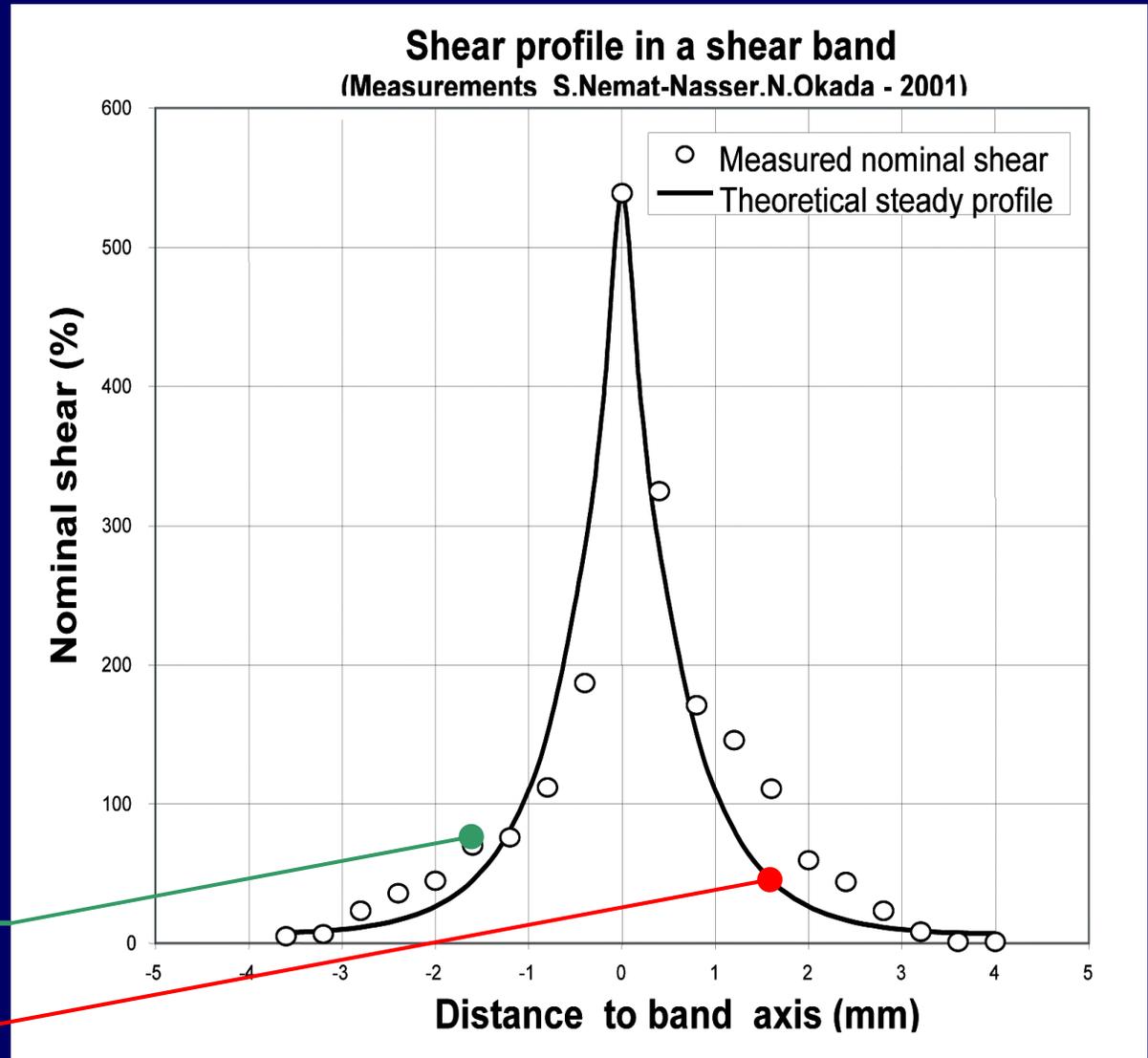
Illustration from ASCE J. of Geotechn. and Geoenviron. Engng- March 2000-

1- Dissipation d'énergie par friction – *Confirmations expérimentales*

Hétérogénéité - Localisation:

Structure interne
des bandes de
cisaillement

Mesures
micrométriques
de Nemat-Nasser
et Okada
publiées en 2001
et profil théorique



1- Dissipation d'énergie par friction

HETEROGENEITE - LOCALISATION

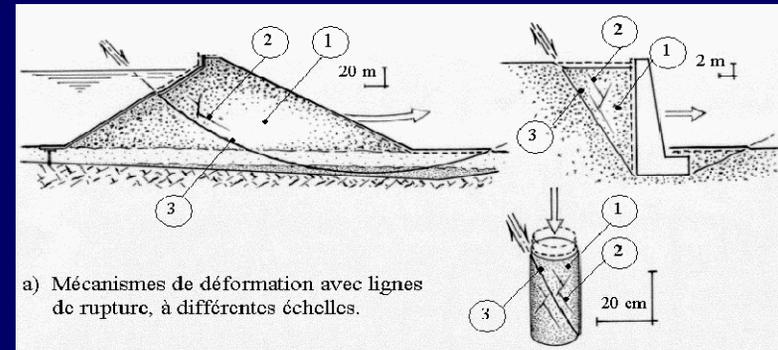
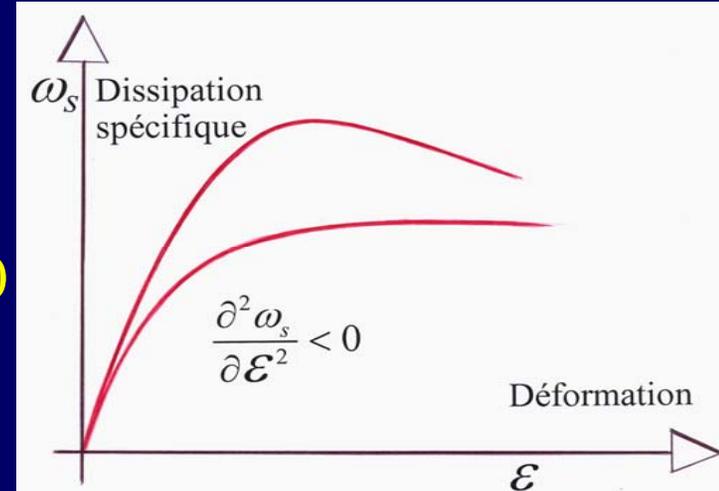
- Critère de Localisation:

Règle de Moindre Dissipation $\rightarrow \frac{\partial^2 \omega_s}{\partial \mathcal{E}^2} < 0$

-Critère d'Evolution:

Moindre Dissipation \rightarrow Maximisation
de $Var(\mathcal{E}) \propto Var(\dot{\gamma})$

**\rightarrow Evolution vers la formation
de lignes de rupture**



a) Mécanismes de déformation avec lignes de rupture, à différentes échelles.

b) Types d'hétérogénéités locales associées, en déformation.

Introduction-Contexte

- 1- Dissipation d'énergie par Friction intergranulaire
- 2- Effets d'échelle dus aux Rupture des granulats



2- Rupture des Granulats- Introduction

a) Ruptures en traction indirecte, par développement de défauts pré-existants – *Mécanique de la Rupture Fragile*-

b) Défauts ds granulats distribués suivant statistique de Weibull =>proba. survie

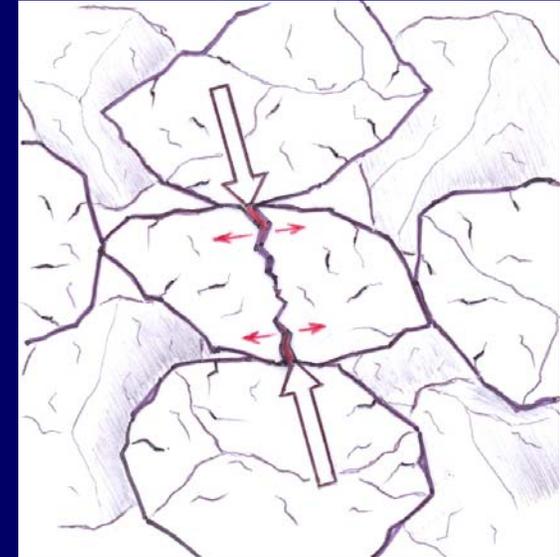
$$P_s(V) = \exp \left[-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad \sigma_f \propto d^{-3/m}$$

c) Correspondance avec résultats classiques de R.Marsal (70's)

$$\bar{P}_a = \eta \cdot \bar{d}^\lambda \quad \rightarrow \quad l = 2 - 3/m$$

d) Tendence centrale $m=6 \Rightarrow \lambda=3/2$ et

$$\sigma_f \propto \frac{1}{\sqrt{d}}$$



2- Effets d'échelle dans la résistance au cisaillement

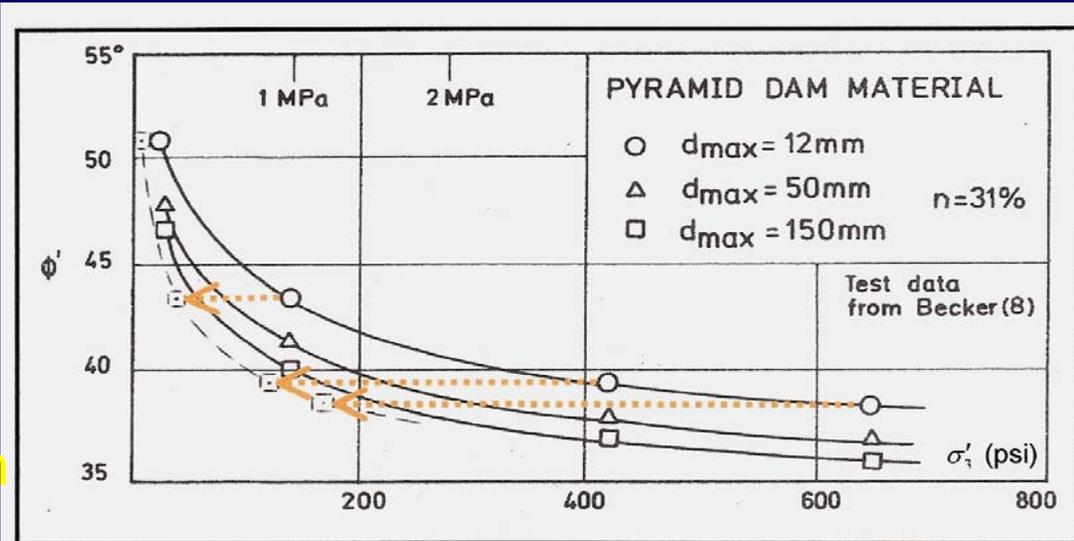
Effet du confinement sur le frottement interne

- compilation de Barton (ASCE 1981)
- Correspondance entre matériaux: par correction de la contrainte de confinement

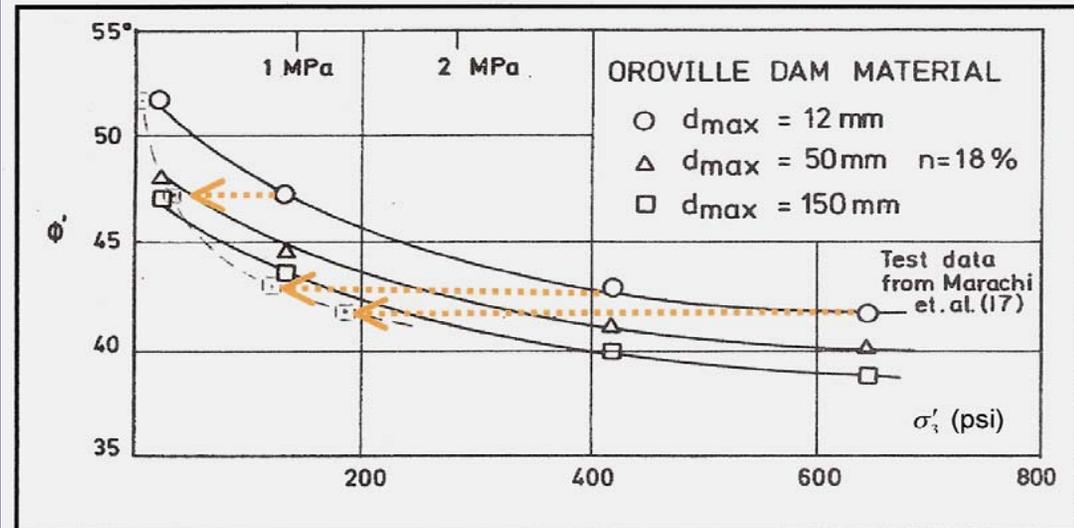
$$\sigma'_3(2) = \sigma'_3(1) \sqrt{\frac{d_{Max}(1)}{d_{Max}(2)}}$$

- Correspondance gravier=>enrochement
- Facteur de corr.:

$$\sigma'_3(ro) = \sigma'_3(gr) \sqrt{\frac{12mm}{150mm}}$$

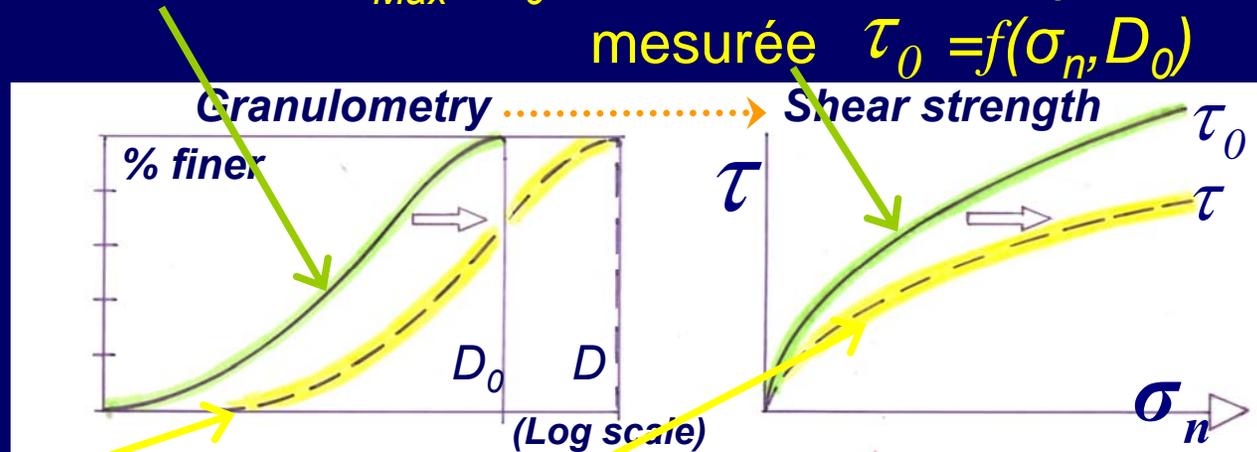


150 ← 12 Affinité de rapport $\sqrt{12/150}$



2- Effets d'échelle dans la résistance au cisaillement

→ **Règle d'Effet d'Echelle**: matériaux granulaires issus d'un même stock minéral, granulométries géométriquement semblables, même compacité. Matériau de référence $d_{Max}=D_0$ → Courbe intrinsèque mesurée $\tau_0 = f(\sigma_n, D_0)$



Matériau semblable
Plus gros $d_{Max}=D$
Nlle Courbe intrinsèque →

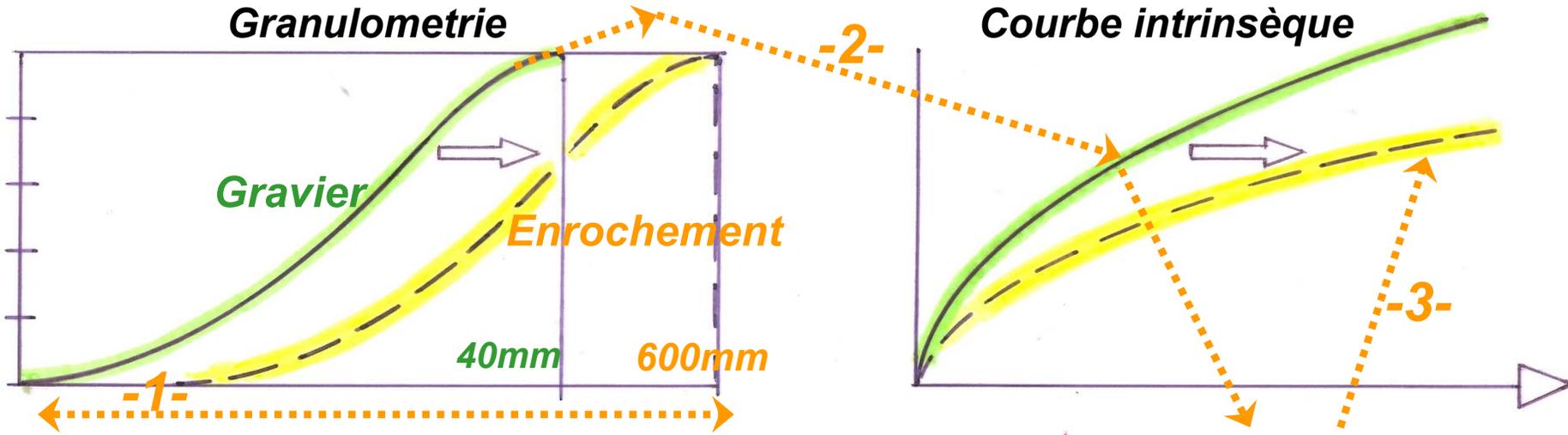
$$\tau(\sigma_n, D) = \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-3/m} \cdot \tau_0 \left[\sigma_n \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^{3/m}, D_0 \right]$$

Courbe intrinsèque $\tau_0(\sigma_n, D_0) = A_0 \cdot \sigma_n^b \Rightarrow \tau(\sigma_n, D) = A_0 \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^{\frac{-3(1-b)}{m}} \cdot \sigma_n^b$

pour D_{Max} 150 mm, tendance centrale $\tau = 4 \cdot \sigma_n^{0,77}$ (en KPa)

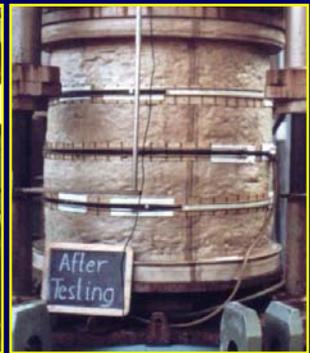
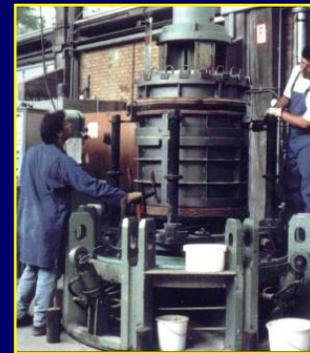
2- Effets d'échelle dans la résistance au cisaillement

➔ Méthode d'évaluation de courbe intrinsèque d'enrochements



1- Tests écrasement granulats (➔ «m»)

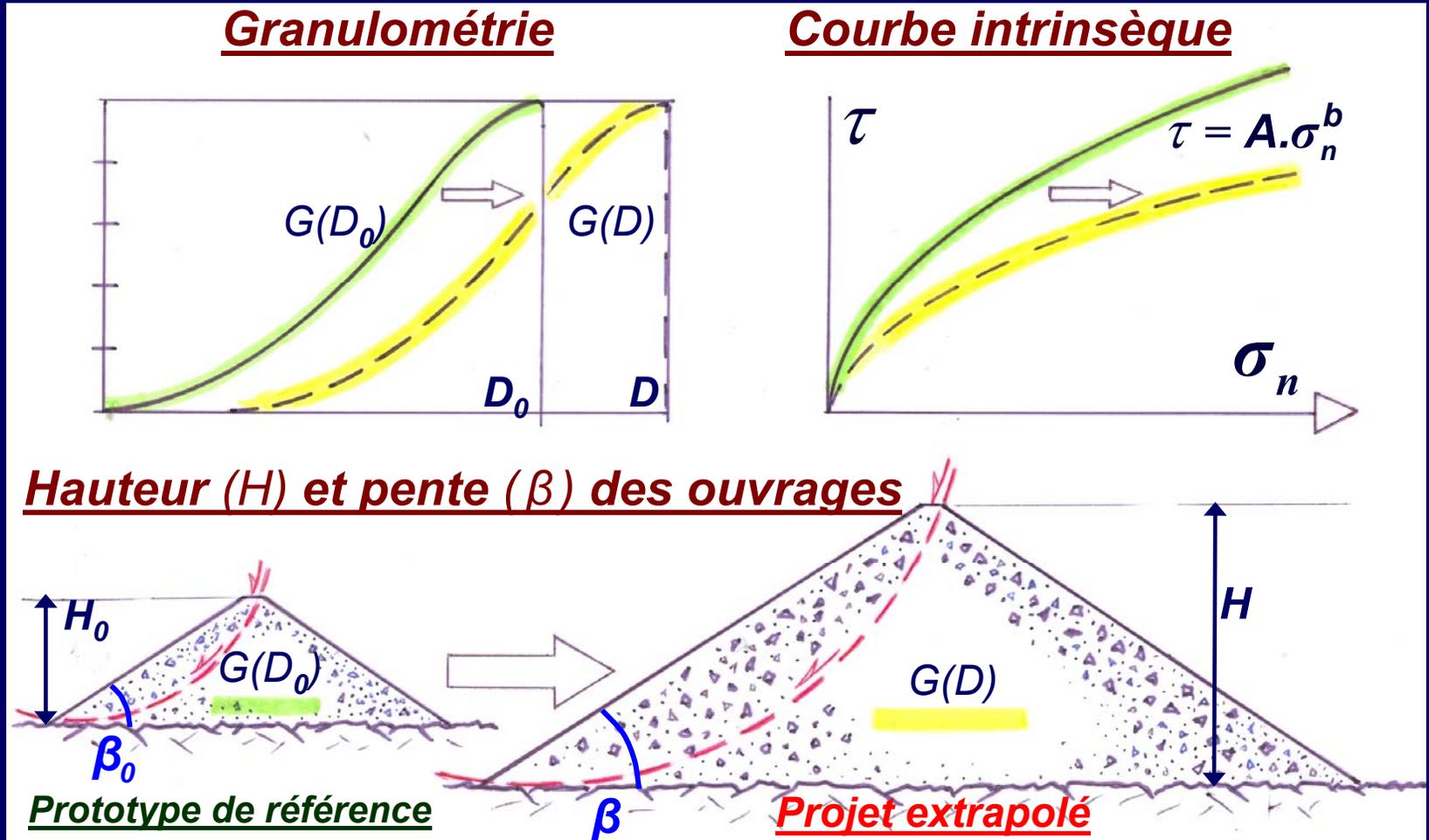
3- Règle d'Effet d'Echelle



➔ Réduction masse d'échantillon représentatif par $(1/15)^3 \sim 1/3400$

2- Effets d'échelle dans le comportement d'ouvrages

Marges de sécurité vis-à-vis de la rupture par cisaillement



2- Effets d'échelle dans le comportement d'ouvrages

→ Charles & Soares (1984):
Stabilité / rupture cisaillement
«simplified Bishop method of
slices», courbe intrinsèque
parabolique.

$$F_s = \frac{A \cdot \Gamma(b, \beta)}{(\gamma \cdot H)^{(1-b)}}$$

→ Fonction de stabilité
adimensionnelle $\Gamma(b, \beta)$
pratiquement linéaire en
fonction de la pente $\cot \beta$

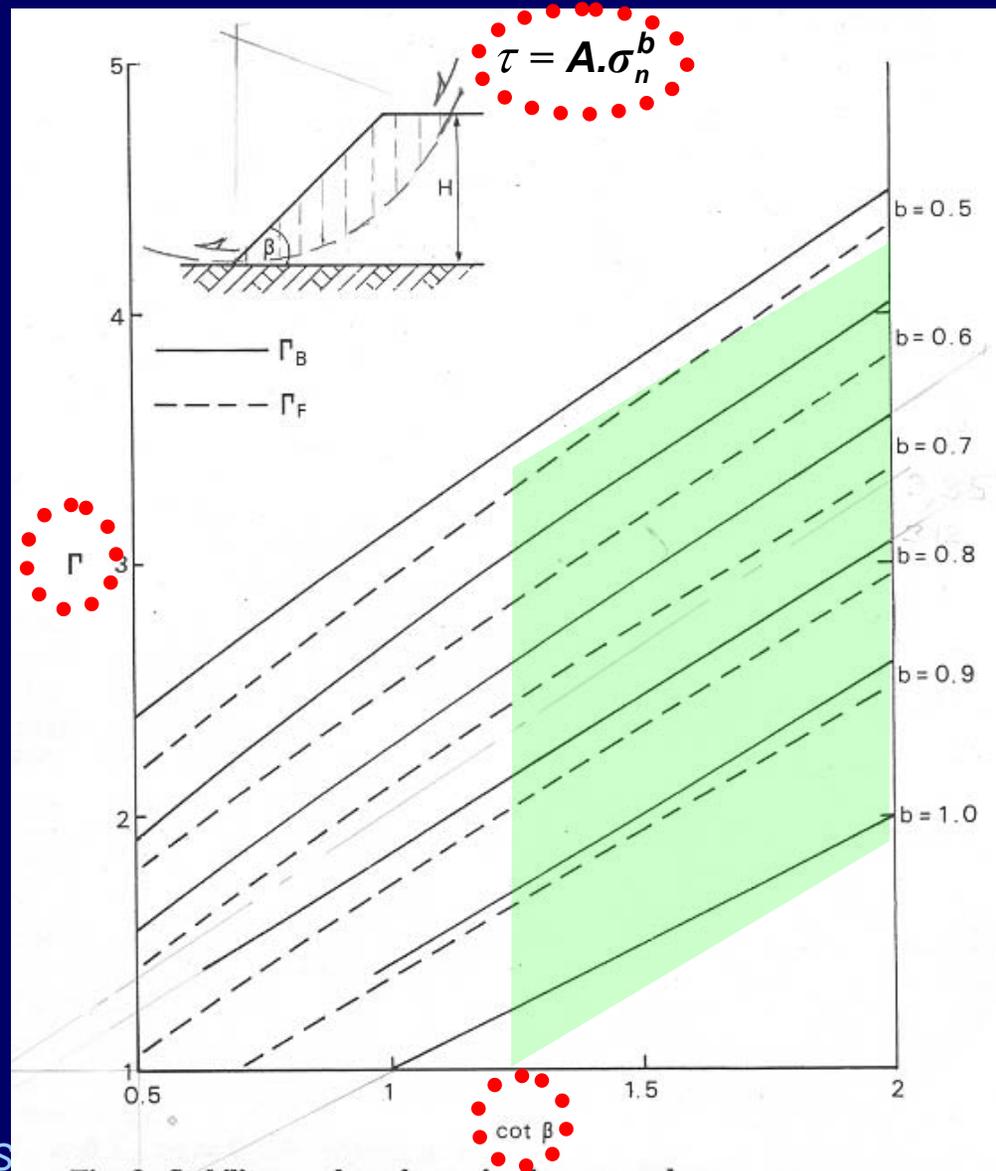


Fig. 3. Stability numbers from circular arc analyses

2- Effets d'échelle dans le comportement d'ouvrages

Facteurs de Sécurité *Ouvrages plus hauts?* *Matériaux plus gros?* *Pentes plus raides?*

$$\frac{F_S(H, D, \beta)}{F_{S_0}(H_0, D_0, \beta_0)} \approx \left(\frac{H}{H_0}\right)^{(b-1)} \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^{\frac{3(b-1)}{m}} \cdot \left(\frac{c + d \cdot \cot \beta}{c + d \cdot \cot \beta_0}\right)$$

Ex. $\frac{H}{H_0} = 200\text{m}/100\text{m}$ $\frac{D}{D_0} = 100\text{cm}/40\text{cm}$ $\begin{cases} b \approx 0,77 ; m \approx 6 \\ c \approx 0,69 ; d \approx 1,28 \end{cases}$

$$\Rightarrow \frac{F_S(200\text{m}, D_{100\text{cm}}, 1.3h/1v)}{F_{S_0}(100\text{m}, D_{40\text{cm}}, 1.4h/1v)} \approx \frac{1}{1,37}$$

Données type: F_{S_0} (Prototype) = 1,50 et F_S (Projet) = 1,10

2- Effets d'échelle dans le comportement d'ouvrages



2- Effets d'échelle dans le comportement d'ouvrages

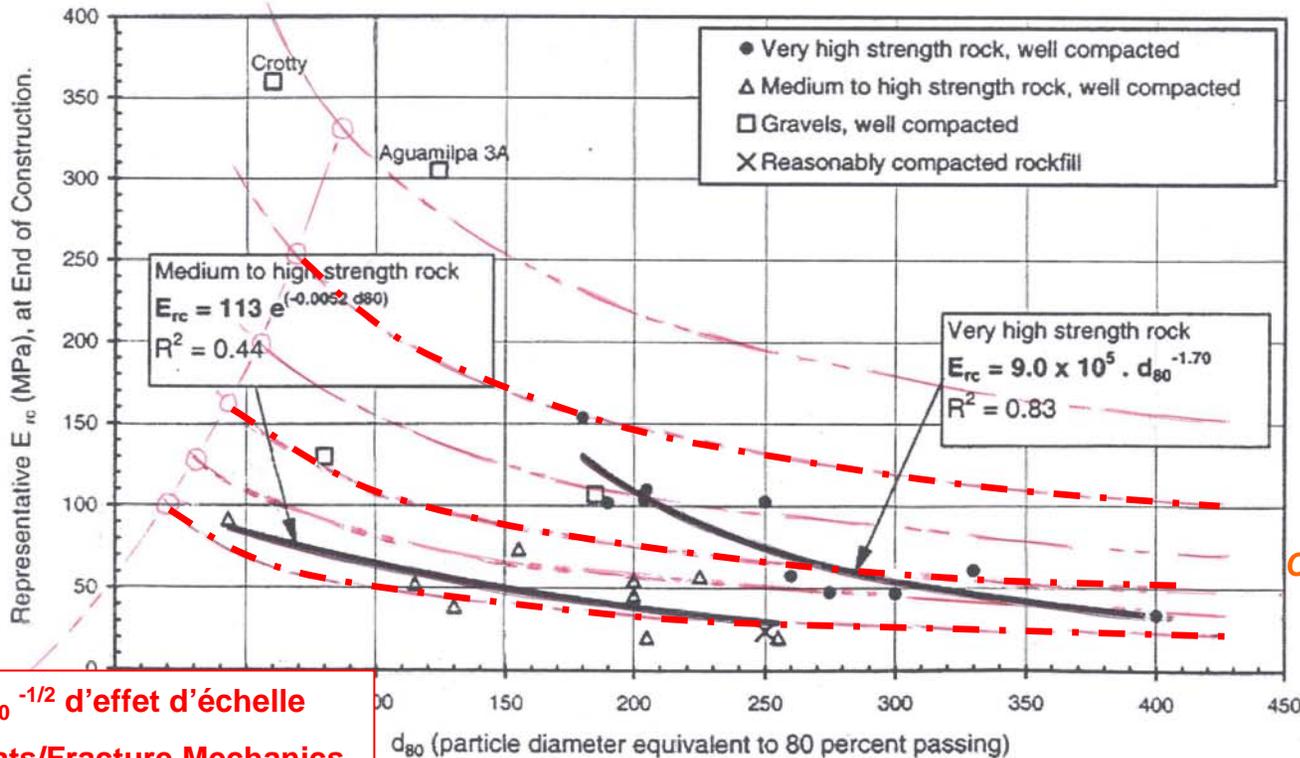
Modules de rigidité apparents



CFMS –Paris- 12 Mars 2008

2- Effets d'échelle dans le comportement d'ouvrages

« Module de rigidité » Ref. « *Rockfill Modulus and settlement of Concrete Face Rockfill Dams* » G.Hunter, R.Fell- J. of Geotec. Eng. ASCE Oct 2003
 Analyse statistique sur 35 barrages, « bien documentés ».



Tendance en $d_{80}^{-1/2}$ d'effet d'échelle
 Rupture granulats/Fracture Mechanics

Fig. 3. Representative secant modulus of compacted rockfill at end of construction E_{rc} versus rockfill particle size and unconfined compressive strength

Conclusions



Merci pour votre attention...