

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

AVANCEES RECENTES DANS LA PHYSIQUE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

Etienne FROSSARD

Expert

Direction Scientifique

AVANCEES RECENTES DANS LA PHYSIQUE DU COMPORTEMENT MECANIQUE

1- **Introduction-Contexte**

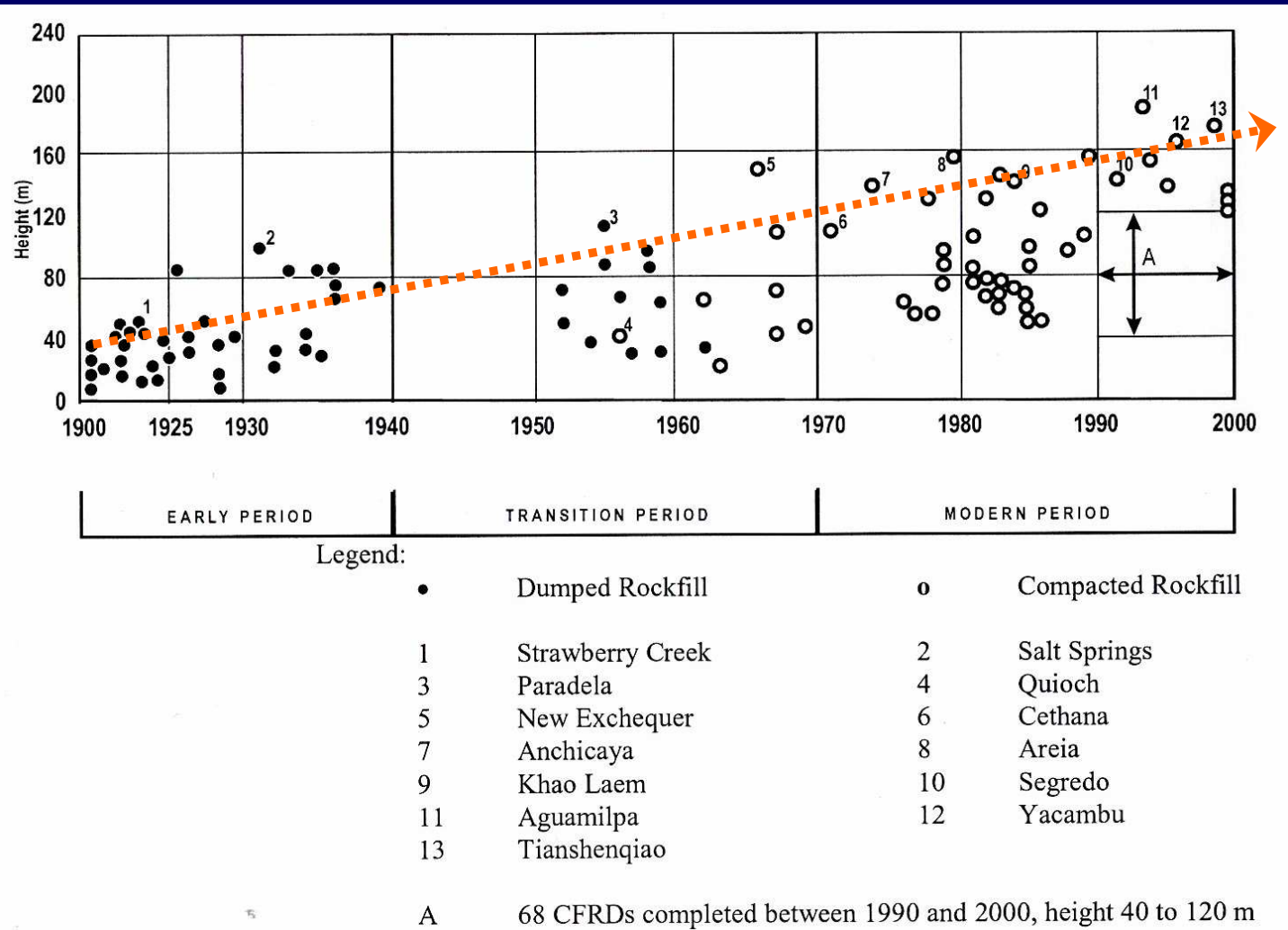
2- **Processus de dissipation d'énergie par**
Friction intergranulaire

3- **Processus de dissipation d'énergie par**
Rupture des granulats

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

1- Introduction -Contexte

Tendance: recherche d'économies croissantes sur des ouvrages de plus en plus grands



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

1- Introduction -Contexte

Des ouvrages de plus en plus grands

Shuibuya (Chine- 233m)



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

1- Introduction -Contexte

..comportant des défis en proportion des ouvrages



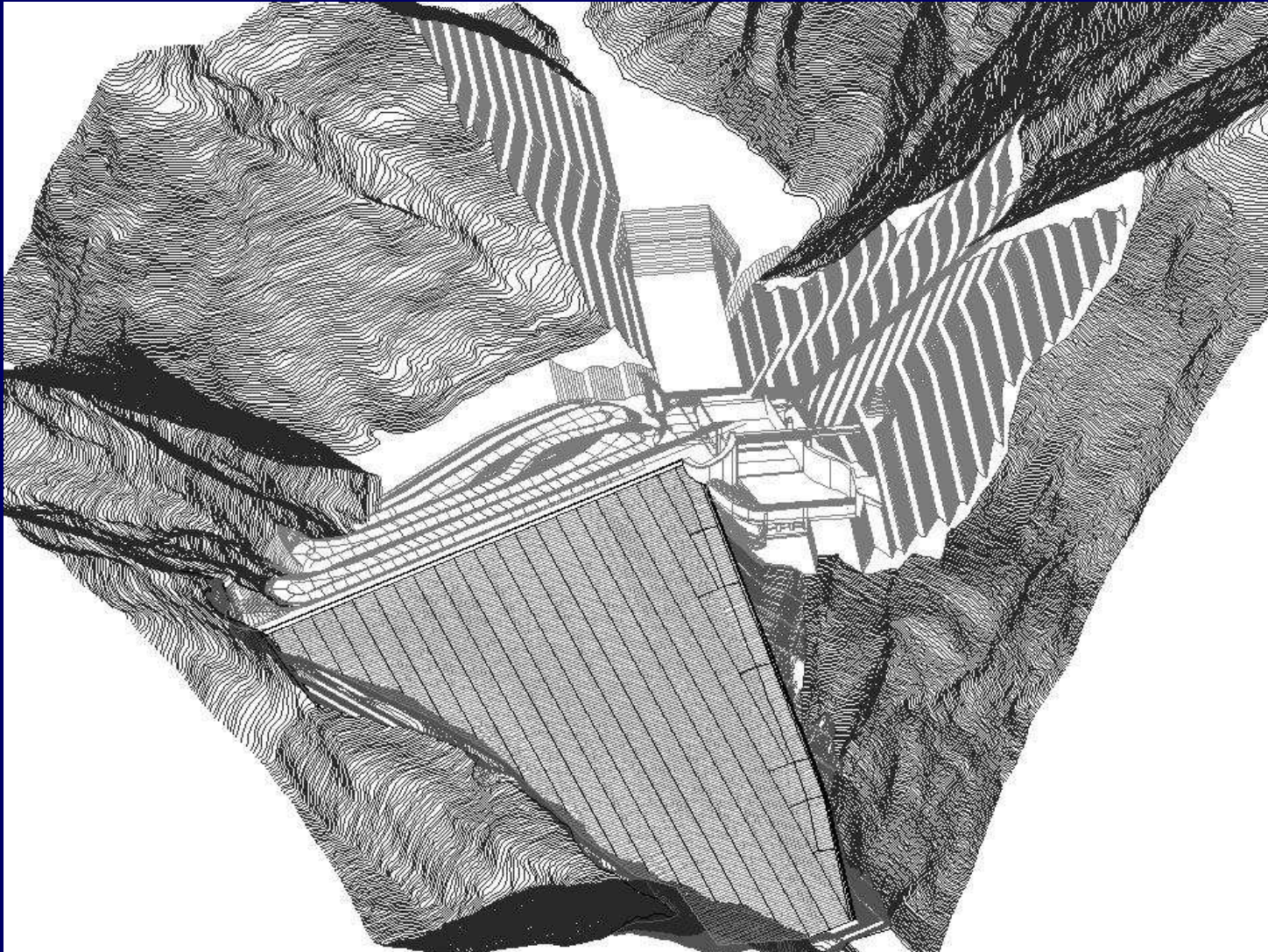
Karhanjukar
(Islande -190m)

Journée Technique CFGB-CFGL-CFMR-CFMS- 2 Février 2006

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

1- Introduction -Contexte

Mazar(Equateur185m)



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

1- Introduction -Contexte

- Synthèse réalisée dans le cadre du Projet Micromécanique des Barrages en Enrochements (*en coopération avec EdF / ITASCA / LTDS Centrale Lyon*)
- Réinterprétation de compilations de résultats expérimentaux, à la lumière des connaissances actuelles
- Mise au jour d'éléments nouveaux, reliés à deux processus énergétiques: la dissipation d'énergie par friction, et par ruptures.

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

Journée Technique CFGB-CFGL-CFMR-CFMS- 2 Février 2006

1- Introduction-Contexte

2- **Processus de dissipation d'énergie par**
Friction entre granulats

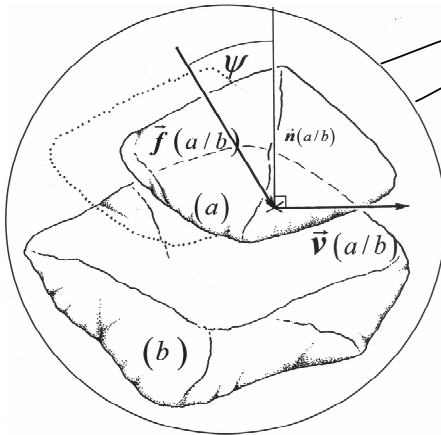
3- **Processus de dissipation d'énergie par**
Rupture des granulats

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

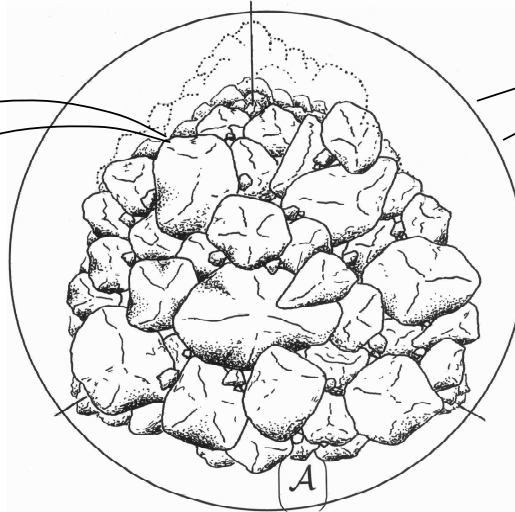
a) Contact élémentaire

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



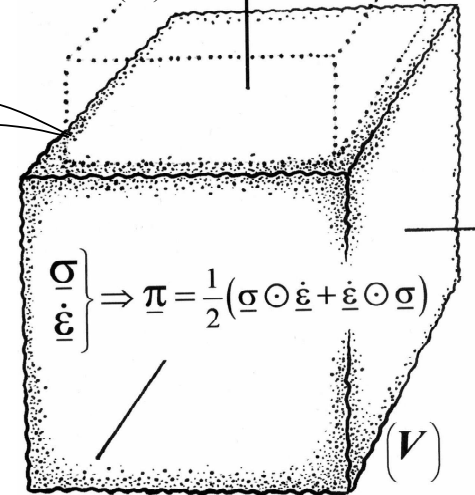
b) Amas granulaire discontinu

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



c) Continuum Equivalent

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



Le concept des Actions Intérieures

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

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

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

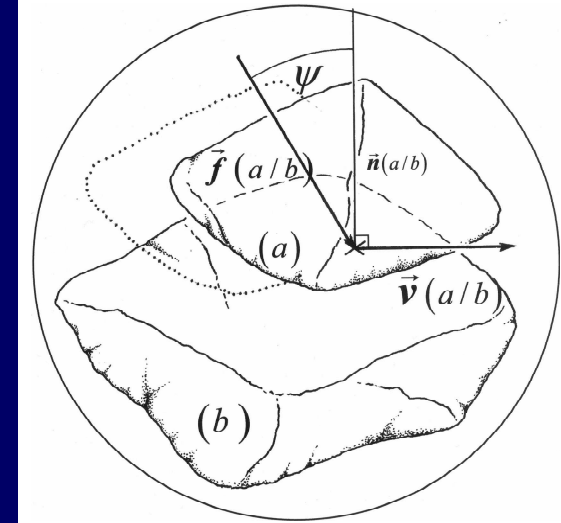
$Trace\{\mathbf{p}(c)\} = \vec{f} \cdot \vec{v}$ puissance
développée par l'effort de contact

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

- Dissipation par friction :

$$Trace\{\mathbf{p}(c)\} = \sin \psi \cdot N\{\mathbf{p}(c)\}$$

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



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

CONTACT ELEMENTAIRE

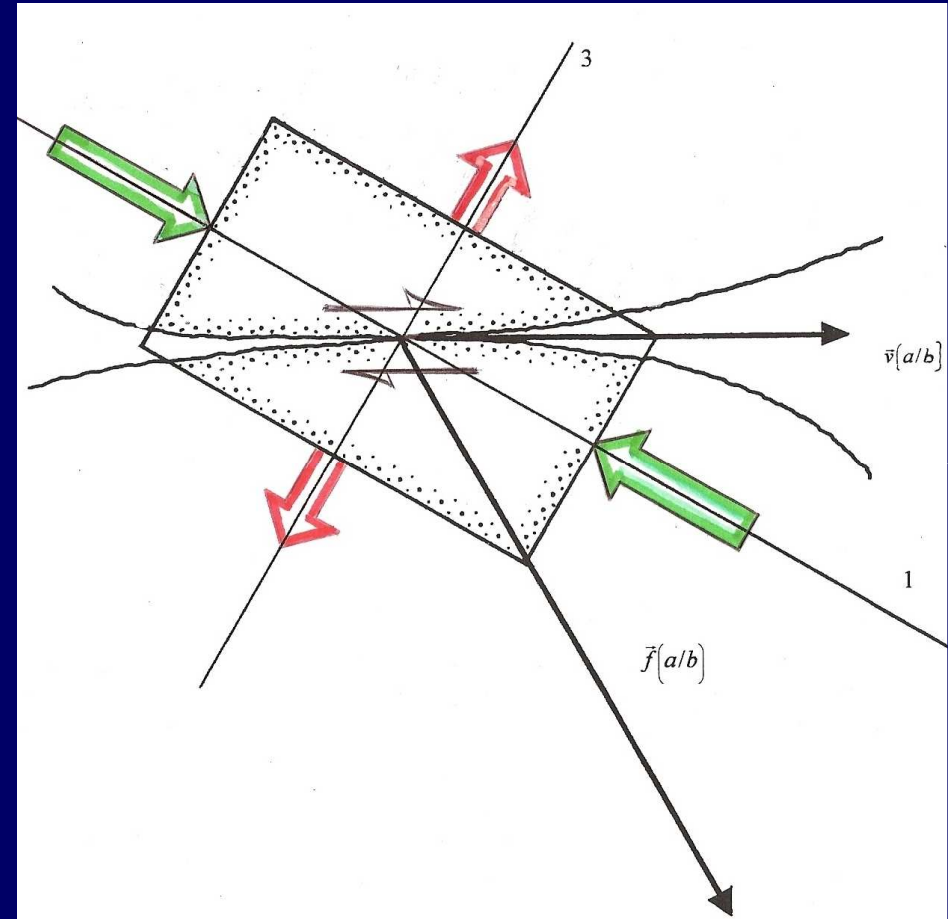
Actions de contact:

« Puissance Reçue » \mathbf{p}^+

« Puissance Rendue » \mathbf{p}^-

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

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



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

AMAS GRANULAIRE

Mouvement des contacts élémentaires

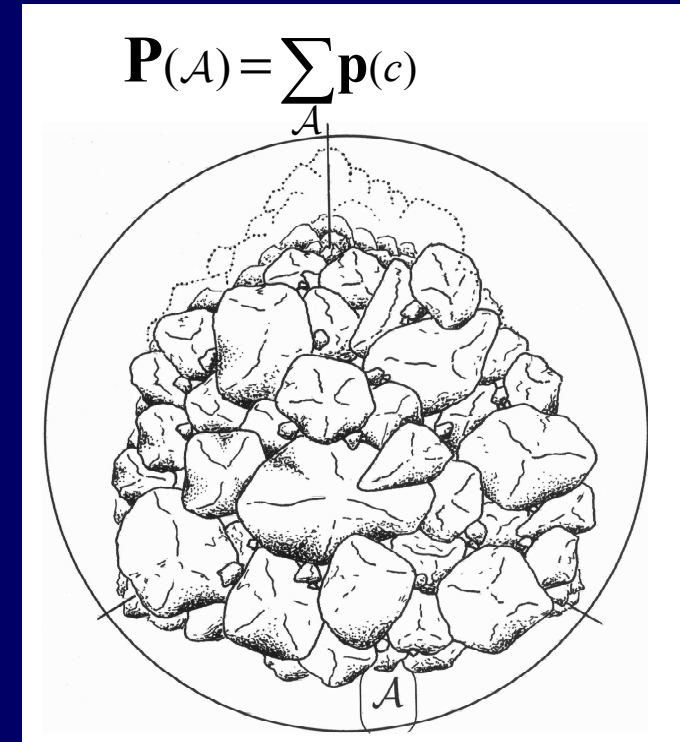
→ Dissipation par friction

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

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



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

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

AMAS GRANULAIRE

Population de contacts élémentaires

(distribution statistique d'actions de contact)

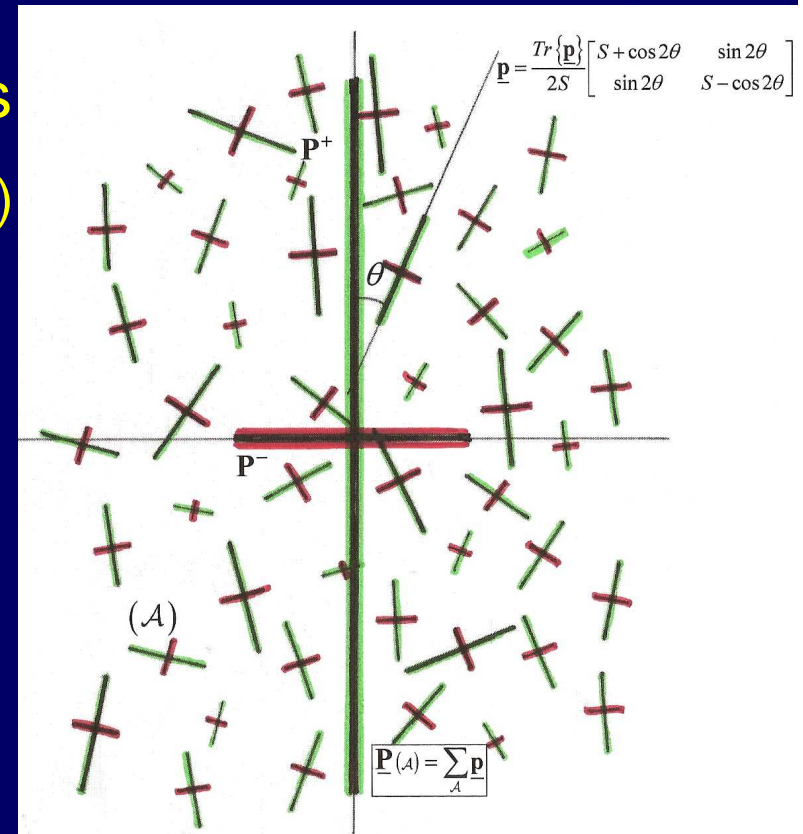
=> échanges d'énergie entre contacts voisins

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

R Taux de réalimentation interne

$$0 \leq R(\mathcal{A}) \leq 1$$

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



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

AMAS GRANULAIRE

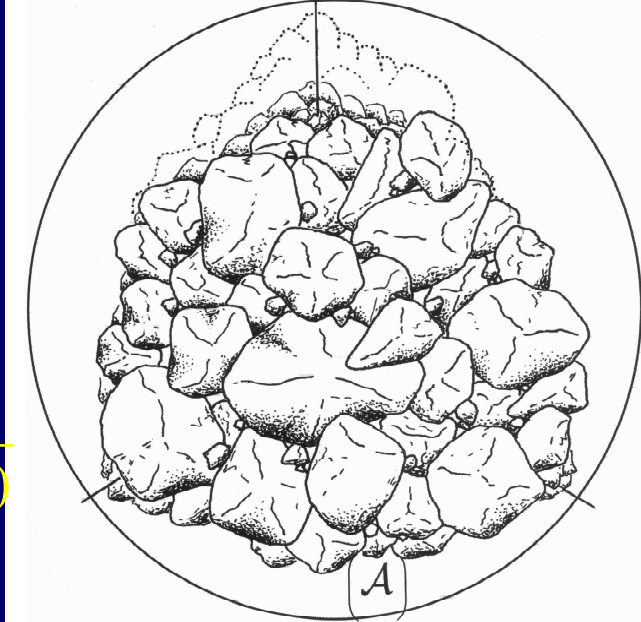
→ Dissipation par friction, avec effet de réalimentation interne

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

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

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

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



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

AMAS GRANULAIRE:

Thermodynamique des systèmes dissipatifs

→ Règle de Moindre Dissipation

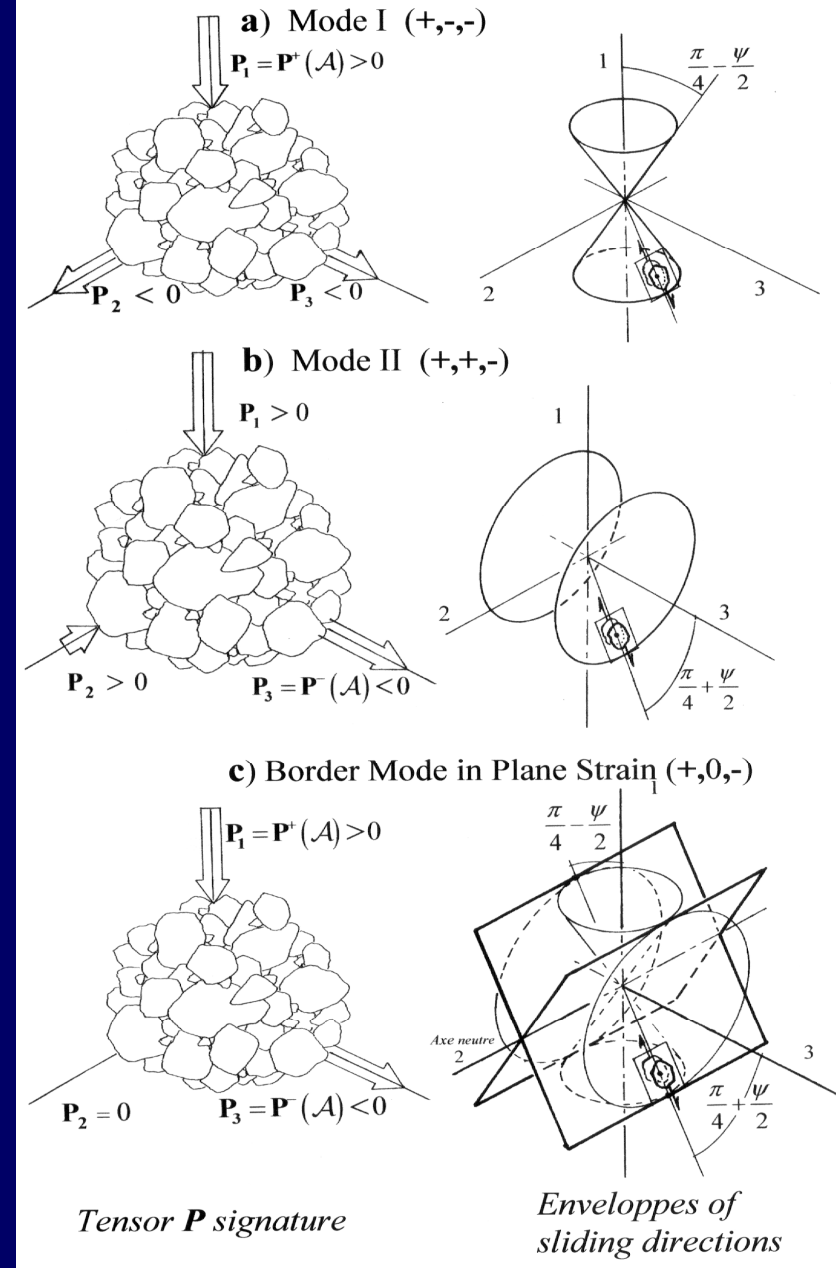
→ Rôle asymptotique des

Modes de dissipation minimale

(avec $R=0$)

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

- similitude interne



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

MILIEU CONTINU EQUIVALENT

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

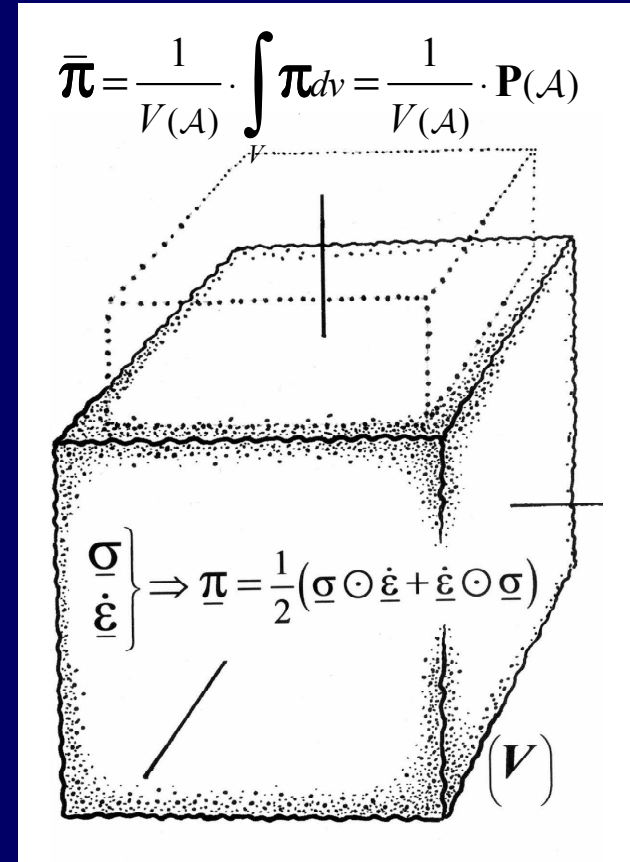
→ Actions intérieures du milieu continu

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

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

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



Milieu continu équivalent - Conséquences macroscopiques

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

-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 mouvement alterné, liquéfaction, ..)

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

Milieu continu équivalent - Conséquences macroscopiques

Conséquences *explicites* → un large ensemble de propriétés:

-iii) à volume variable, contraintes axissymétriques 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:

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

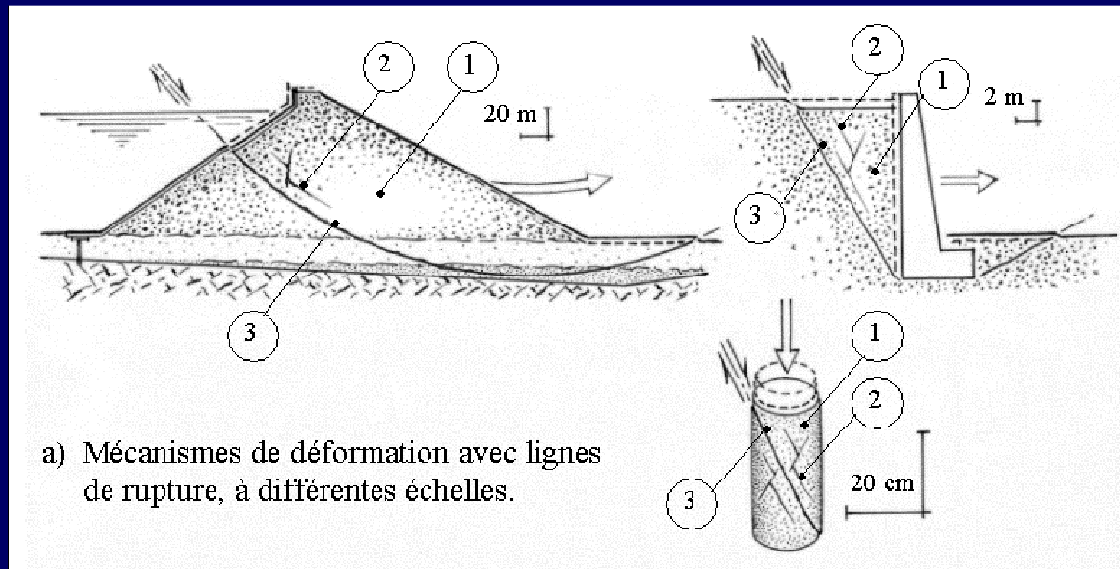
-v) lorsque la friction (valeur de ψ) tend vers zéro, le milieu tend explicitement vers le « *fluide parfait incompressible* ».

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

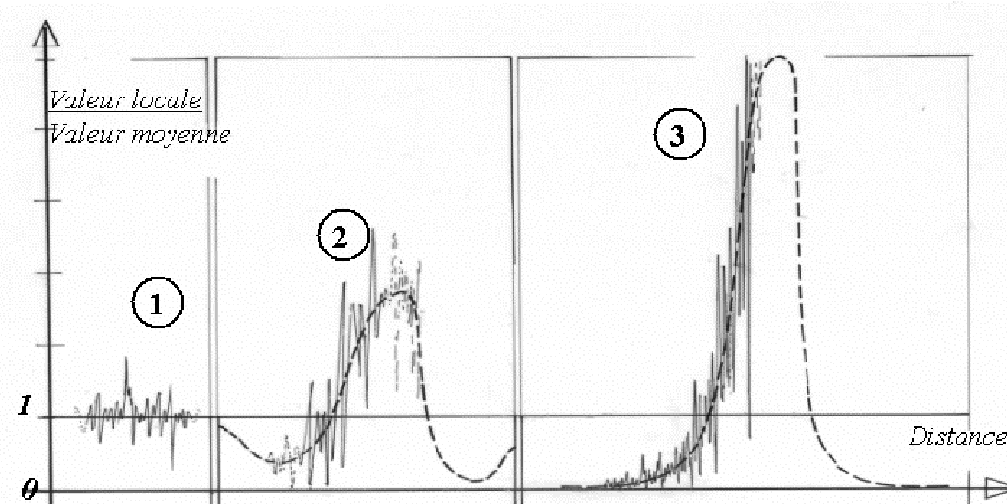
2- Processus de dissipation d'énergie par friction

Journée Technique CFGB-CFGL-CFMR-CFMS- 2 Février 2006

Hétérogénéité
Localisation



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



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

HETEROGENEITE- LOCALISATION

Actions intérieures →

-sous déformations d'ampleur suffisante, les bandes de cisaillement localisées tendent vers la déformation plane..

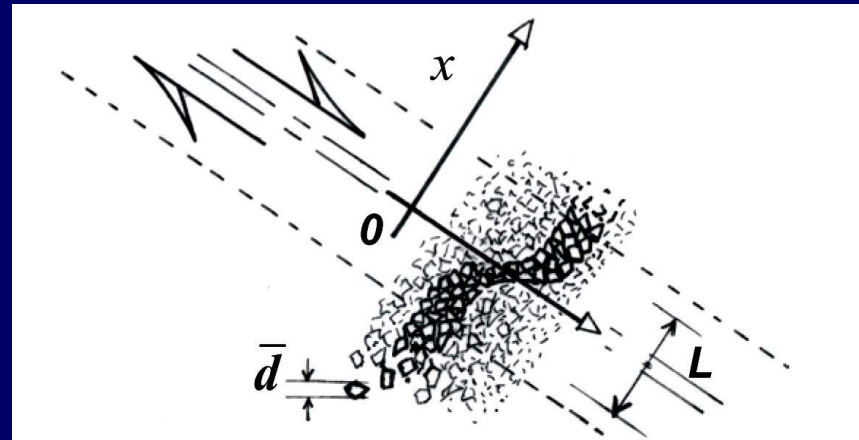
-...et se trouvent inclinées à $\frac{\pi}{4} - \frac{\psi}{2}$
de la direction principale majeure;

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

HETEROGENEITE LOCALISATION

Bande de cisaillement
stationnaire



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

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

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

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

HETEROGENEITE -LOCALISATION

Bande de cisaillement stationnaire:

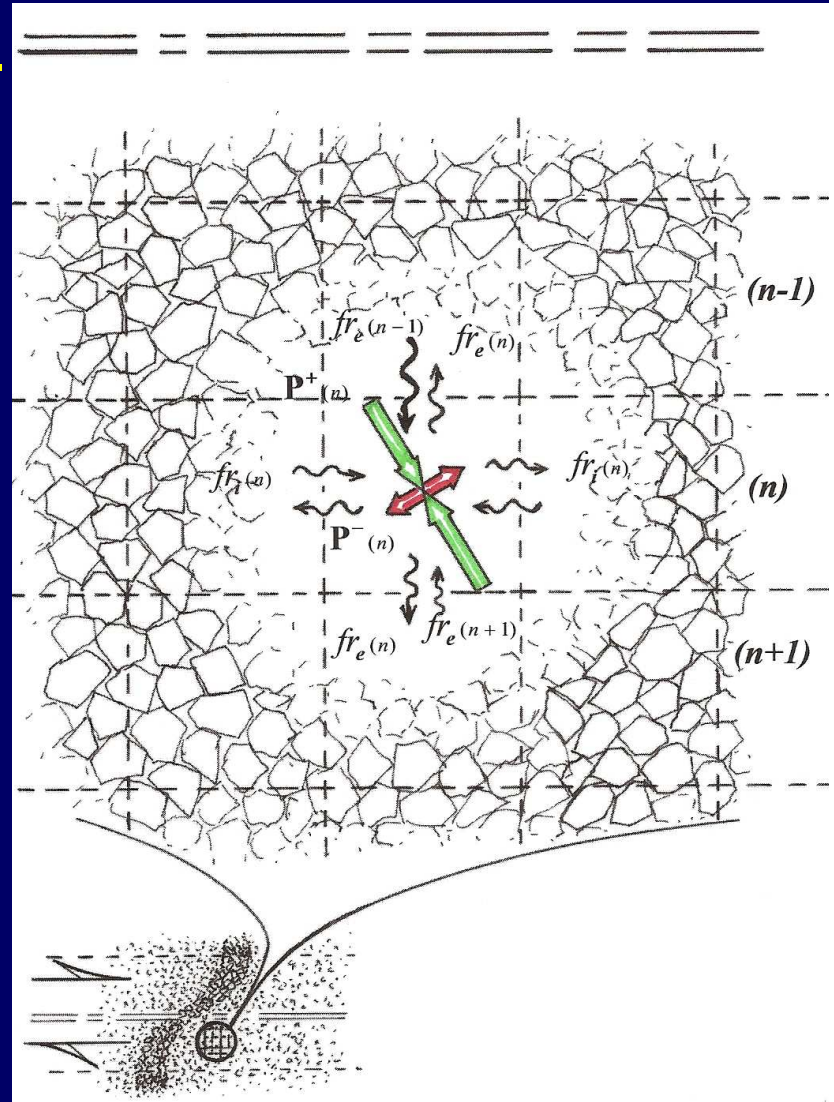
Analyse détaillée des échanges

→ valeur explicite du coefficient matériel k

$$k \approx \frac{1}{5\bar{d}} \cdot \text{Ln}2 \left\{ \frac{1 + \sin \psi}{R(1 - \sin \psi)} - 1 \right\}$$

-milieux à granulométrie étroite

$$k \approx 0,77 / \bar{d} \text{ en m}^{-1}$$



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

HETEROGENEITE

LOCALISATION

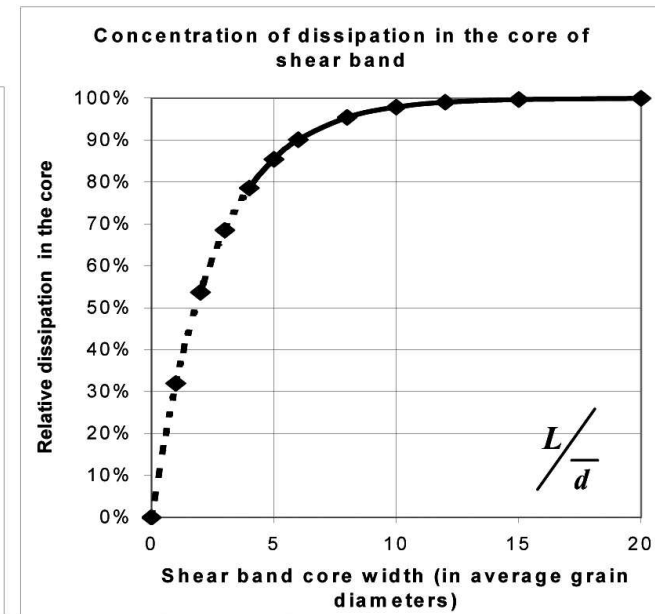
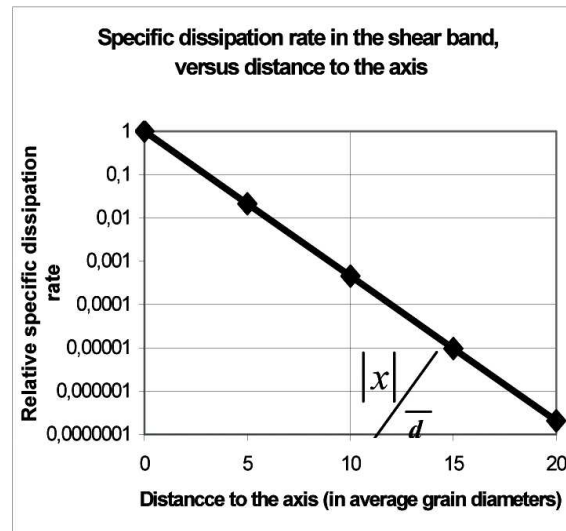
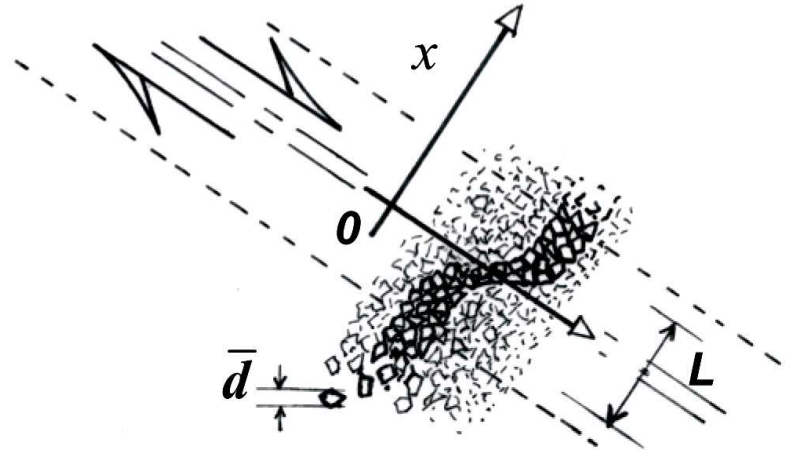
Bande de cisaillement stationnaire:

-profil exponentiel

-structure dissipative

-largeur effective à 99%:

$$12\bar{d}$$



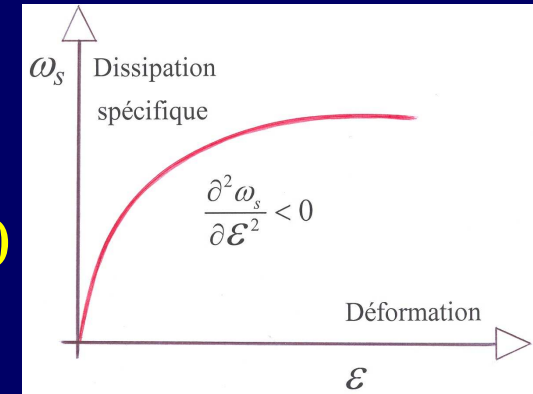
COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

HETEROGENEITE - LOCALISATION

- Critère de Localisation:

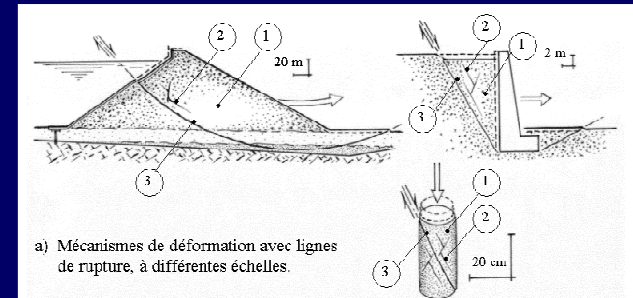
Règle de Moindre Dissipation $\rightarrow \frac{\partial^2 \omega_s}{\partial \mathcal{E}^2} < 0$



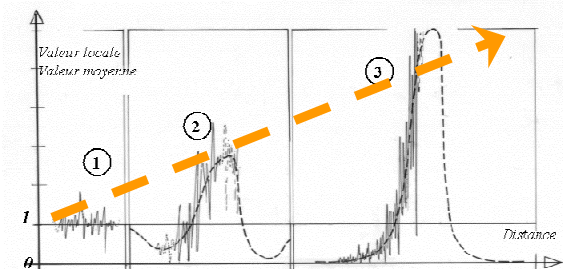
-Critère d'Evolution:

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

Evolution vers la formation
de lignes de rupture



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



Confirmations expérimentales

•Localisation:

- appareil à cylindre creux (Nemat-Nasser & Okada 2001);
- biaxial (Tatsuoka 2000,...)

•Relation de dissipation:

- appareil triaxial (Barden 1966, Frossard 1978, Charles & Watts 1980,,...)
- appareil biaxial (Barden 1969,...), appareil de cisaillement simple (SSA- Stroud 1977)
- presse tridimensionnelle Grenoble (Lanier 1984)

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

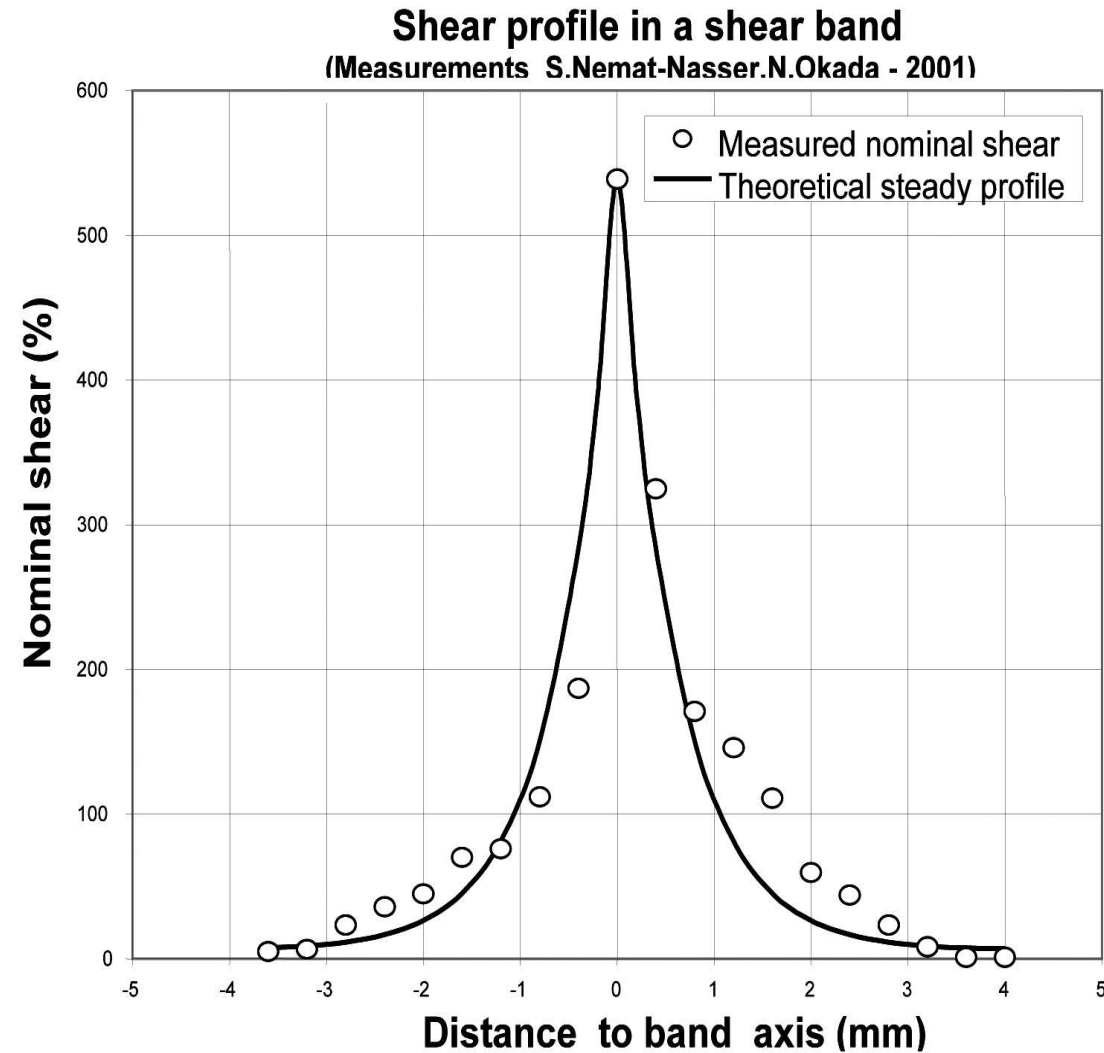
2- Processus de dissipation d'énergie par friction

Confirmations expérimentales

Localisation-

Structure des
bandes de
cisaillement

Journée Technique CFGB-CFMI-CFMR-CFMS- 2 Février 2006

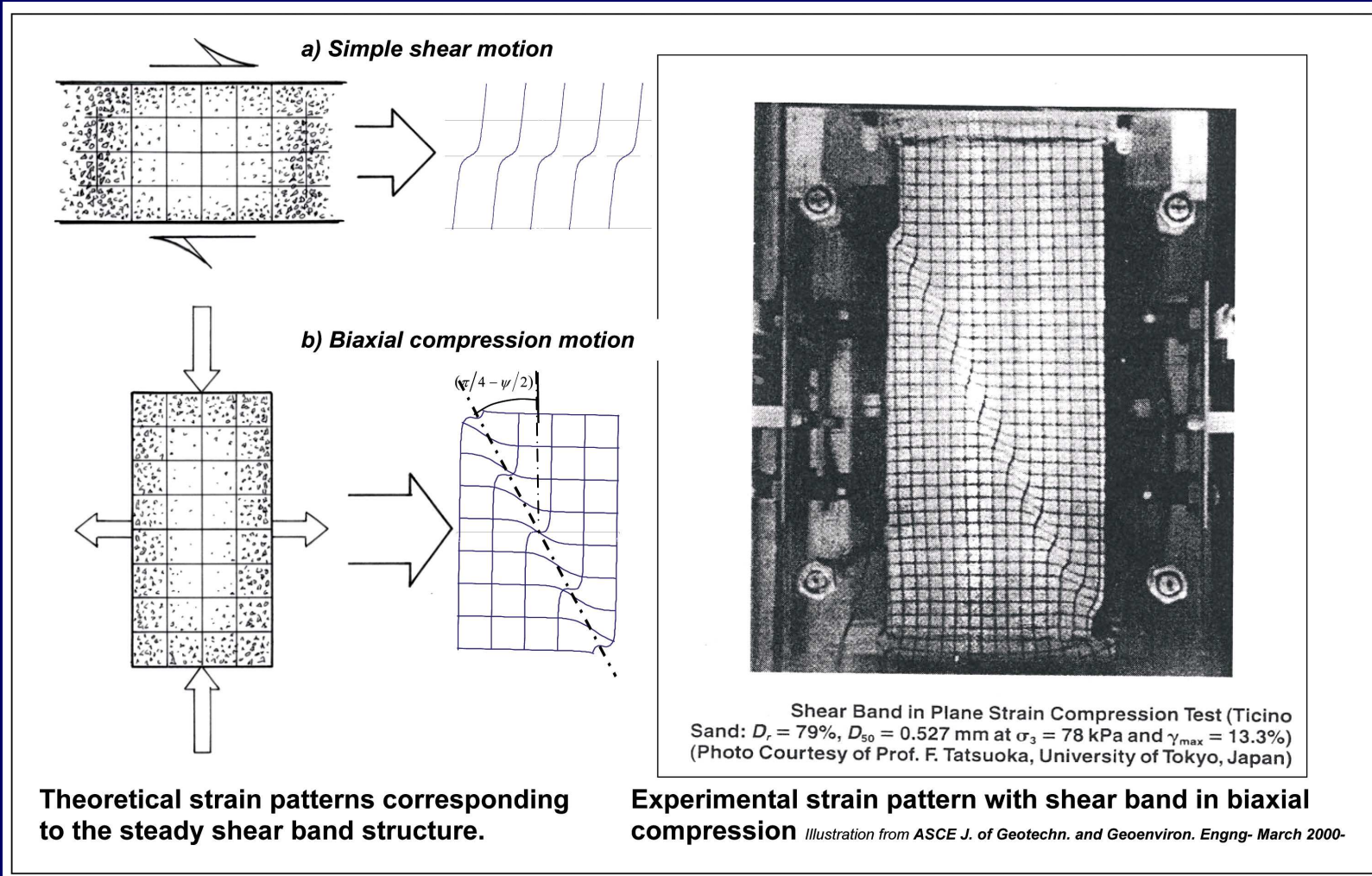


COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

Confirmations expérimentales Localisation- Figures de déformation

Journée Technique CFGB-CFGL-CFMR-CFMS- 2 Février 2006



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

Confirmations expérimentales

Relation de dissipation



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

DILATANCE, DISSIPATION D'ÉNERGIE ET CRITÈRE DE RUPTURE TRIDIMENSIONNEL

21

Essai triaxial en compression

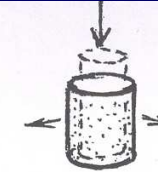


Fig. 1 – A Confinement constant et porosité initiale variable.

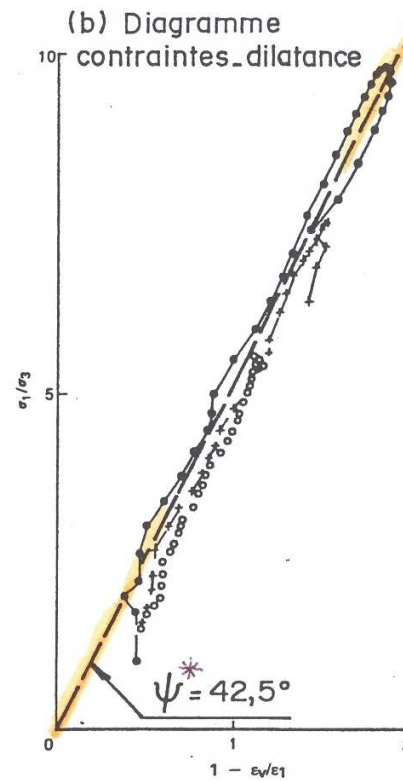
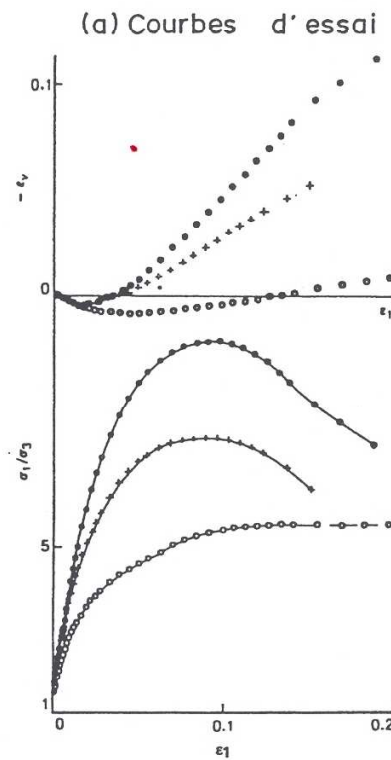
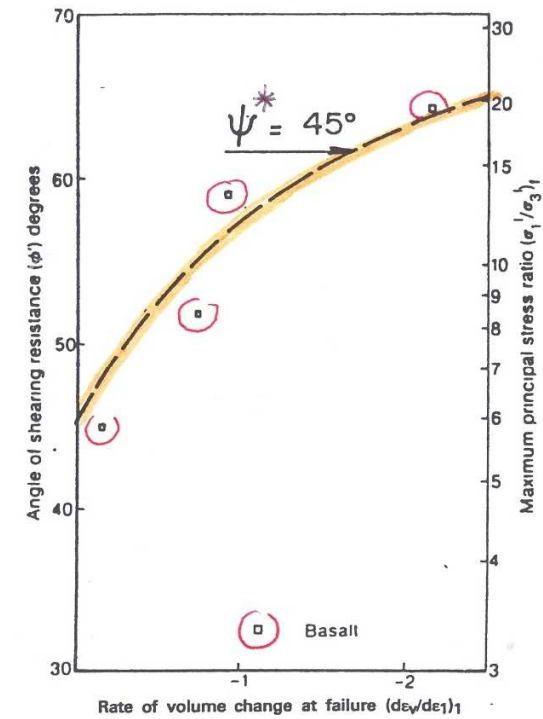


Fig. 2 – A porosité initiale constante et confinement variable. Résultats au pic..



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

Mesures Barden & al. sur River Welland sand (1966-69)

Contraintes axissymétriques

Cycles « Triaxial »

Compression ↔ Extension

Déformation plane
Biaxial

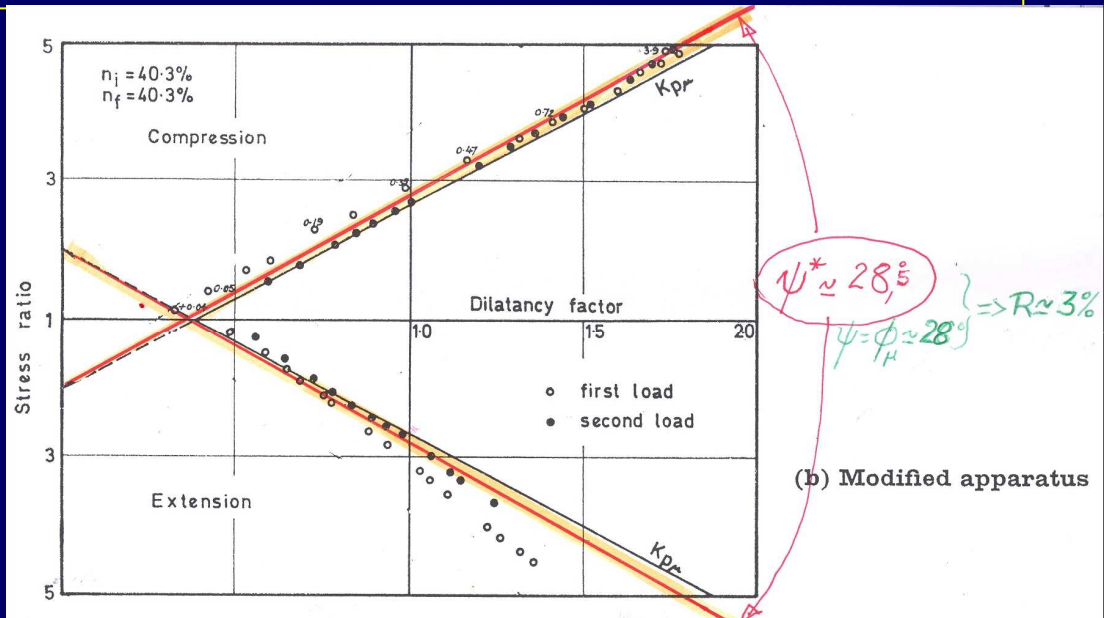


Fig. 10. Stress dilatancy plot for $\sigma_r = 40$ lb/sq. in. cycling tests on dense 4 in. x 4 in. sa

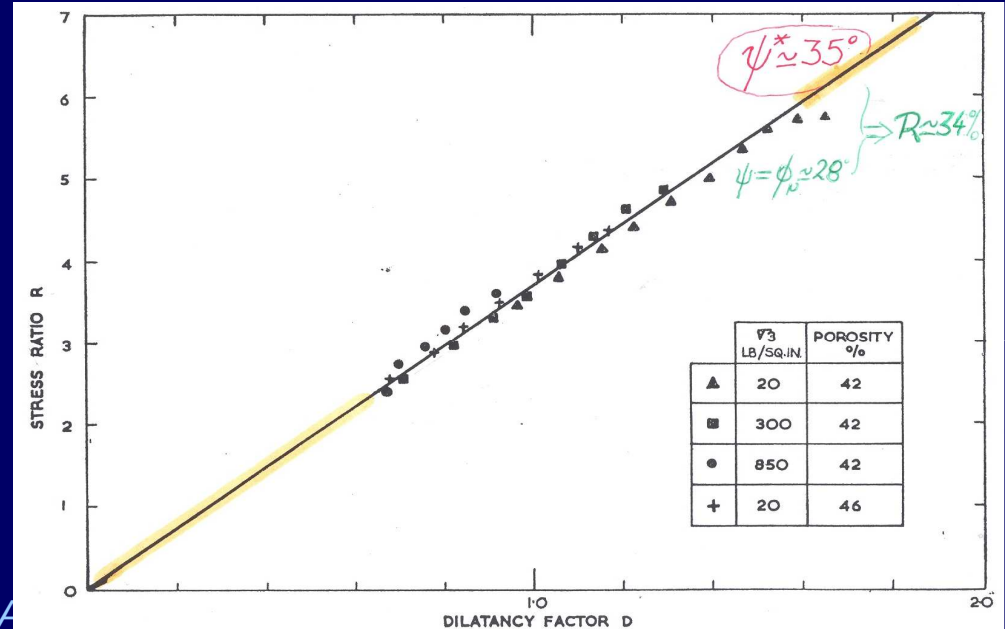


Fig. 3. Stress-dilatancy plots for the tests of Fig. 2

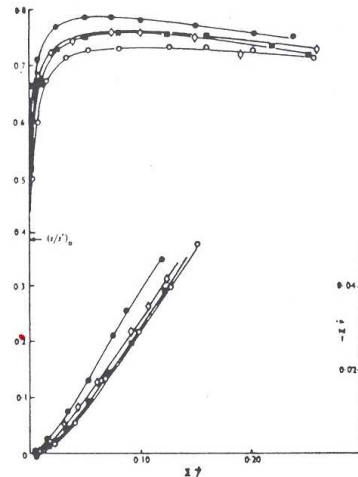
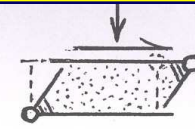
COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Dissipation d'énergie par friction

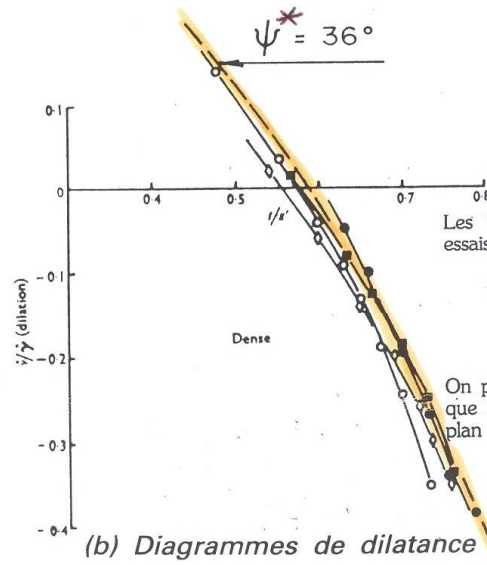
Simple Shear Apparatus

Journée Technique CFGB-CFMI-CFMS- 2 Février 2006

Essai en déformation plane avec rotations d'axes



(a) Courbes d'essai



(b) Diagrammes de dilatance

HUGUES, WROTH et WINDLE (1977) rapportent une série d'essais réalisés par STROUD à l'Université de Cambridge, avec des densités et confinements variés, sur un appareil de déformation plane avec rotation d'axes (cisaillement simple).

Les courbes d'essai sont reproduites figures 3* et 4** où l'on note que la distorsion cumulée $\sum \dot{\gamma}$ a été poussée jusqu'à 50 % dans certains essais.

Les figures 3b et 4b reproduisent la trace de ces essais dans le plan de coordonnées :

$$\begin{cases} x = (\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3) = t'/s' \\ y = -(\epsilon_1 + \epsilon_3)/(\epsilon_1 - \epsilon_3) = \dot{v}/\dot{\gamma} \end{cases}$$

On peut montrer sans peine à partir de l'équation (3) que la trace des essais de déformation plane dans ce plan est théoriquement une hyperbole d'équation :

$$y = (x - \sin \psi^*) / (x \sin \psi^* - 1)$$

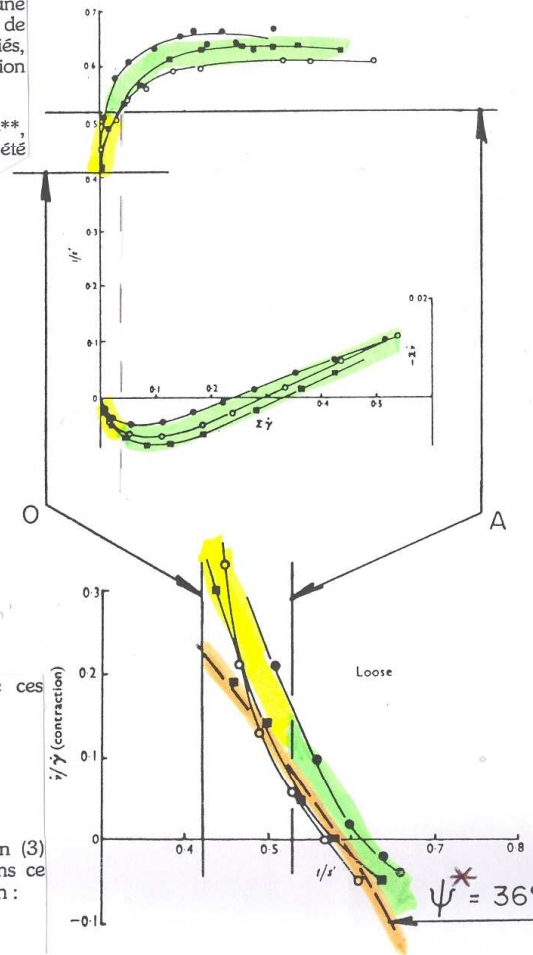


Fig. 4 - Matériau lâche.

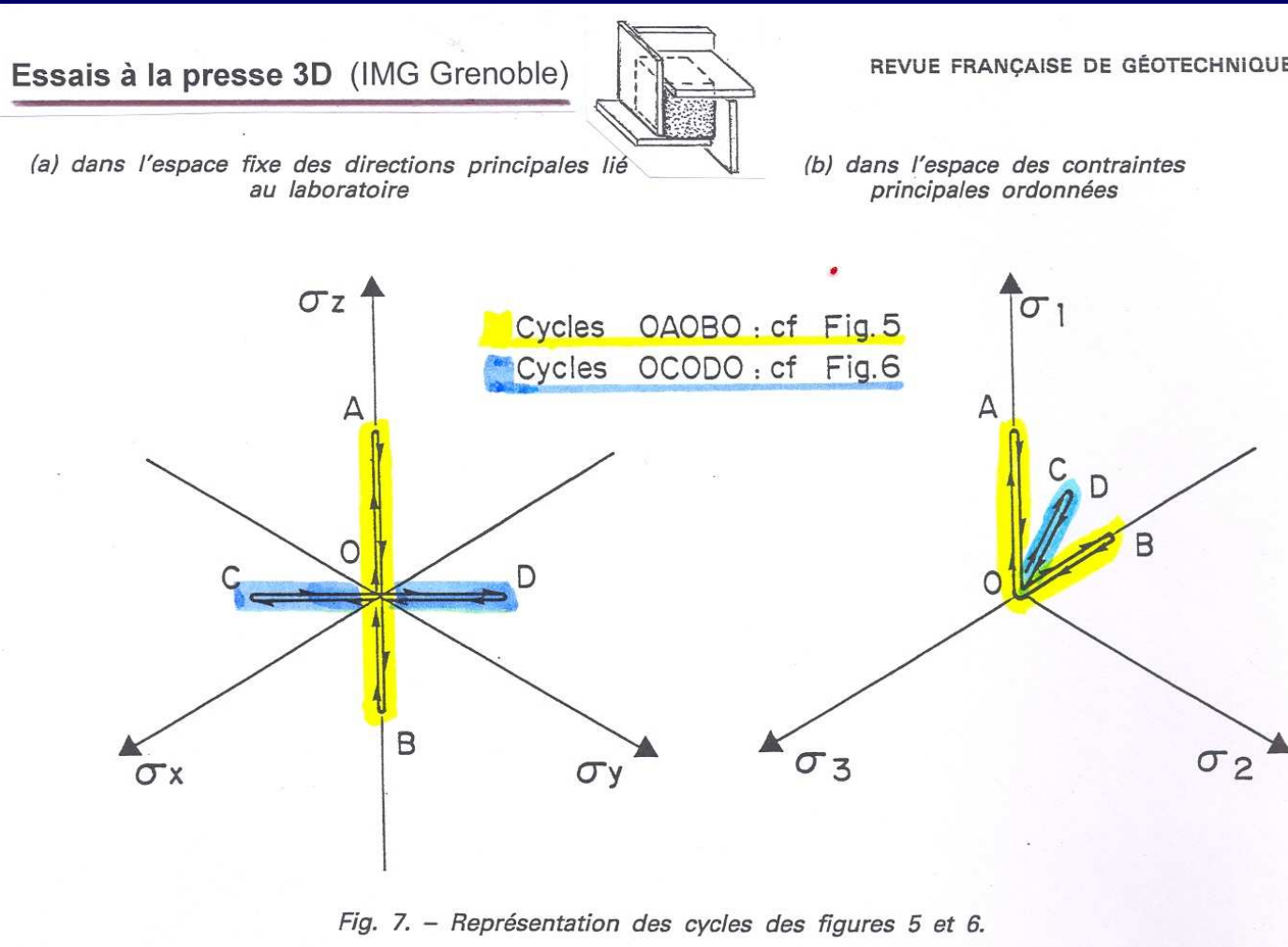
Fig. 3 - Matériau dense.

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

Presse tridimensionnelle -Cycles de grande amplitude J.LANIER 1984

Journée Technique CFGB-CFGL-CFMR-CFMS- 2 Février 2006



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

2- Processus de dissipation d'énergie par friction

Presse tridimensionnelle - Cycles de grande amplitude J.LANIER 1984

Pour tester la validité de la relation de Rowe sur chemin tridimensionnel, LANIER utilise le plan dont les coordonnées sont :

- en abscisses, l'énergie reçue depuis le début de l'essai :

$$X(T) = \int_0^T P_+(t) dt$$

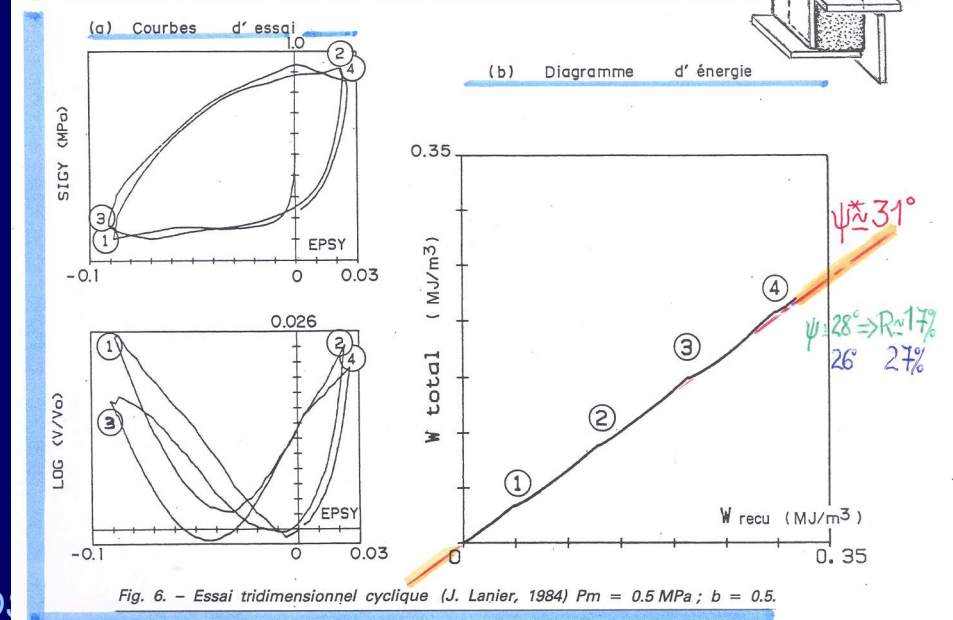
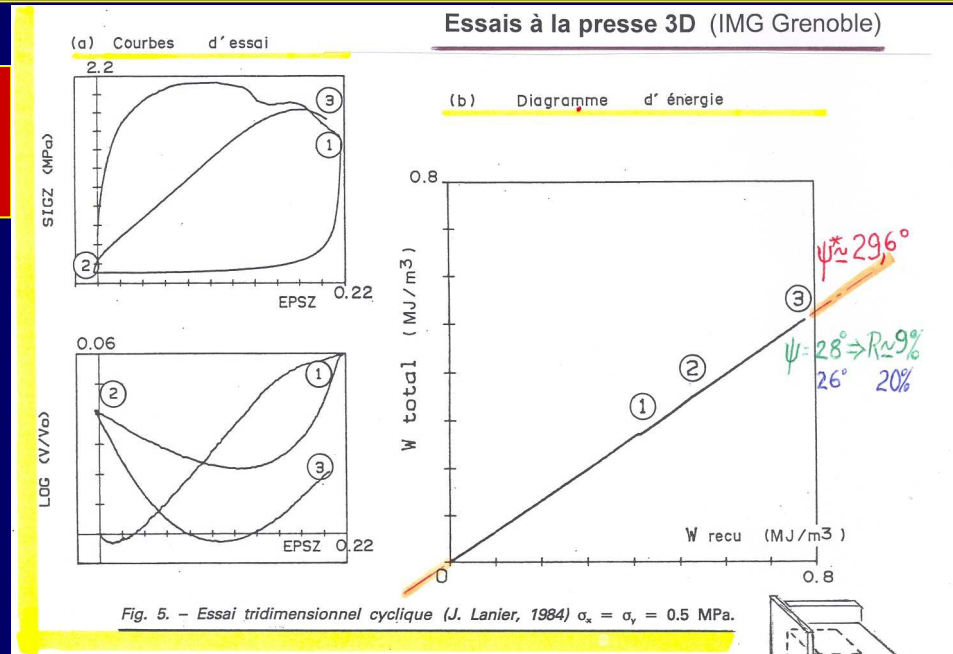
- en ordonnées, le travail des efforts intérieurs ou énergie totale de déformation, cumulé depuis le début de l'essai :

$$Y(T) = \int_0^T [P_+(t) + P_-(t)] dt$$

L'équation de dissipation (3) prévoit que :

$$\frac{[P_+(t) + P_-(t)]}{P_+(t)} = 2 \sin^* \psi / (1 + \sin^* \psi) = \text{constante.}$$

La trace de l'essai dans le plan $[X(T), Y(T)]$, que l'on propose de nommer ici *diagramme d'énergie*, est donc théoriquement une droite, ce qui est étonnamment bien vérifié sur les figures 5b et 6b.



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

1- Introduction-Contexte

2- Processus de dissipation d'énergie par
Friction entre granulats

3- Processus de dissipation d'énergie par
Rupture des granulats

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

3- Processus de dissipation d'énergie par rupture des granulats Introduction

- Augmentation des forces de contact → dépassement du seuil de rupture dans certains granulats, qui se rompent.
- Ruptures par propagation brutale de défauts contenus dans les granulats, régies par la Mécanique de la Rupture .
- Mode de rupture concerné: Mode I , du fait des contraintes de tractions induites dans les granulats (rupture type “Essai brésilien”)
- Pour un granulats contenant un défaut de largeur c , contrainte dans le granulats qui produira la rupture:

$$\sigma_{rt} \approx \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi c}}$$

→ questions: rapports avec la dimension des granulats ? Les contraintes macroscopiques dans le milieu ? La granulométrie ?

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

3- Processus de dissipation d'énergie par rupture des granulats Introduction

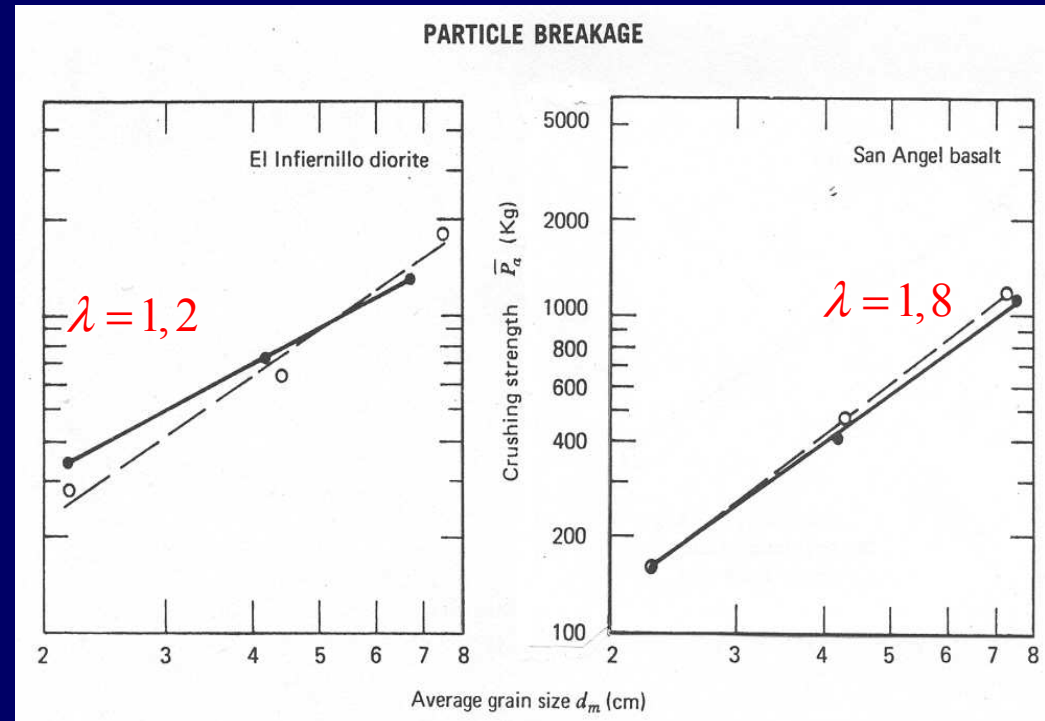
- Résultats de Marsal (1973)-
charge de rupture / diamètre

$$\bar{P}_a = \eta \cdot d_m^\lambda$$

- Théorie de Weibull,
probabilité de survie

$$P_s(V) = \exp \left[- \frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

→ Granulats de diamètre
donné, contrainte de rupture
(à P_s donnée) $\sigma \propto \bar{d}^{-3/m}$



$$\lambda = 2 - \frac{3}{m} \quad \text{ou} \quad m = \frac{3}{2 - \lambda}$$

Valeurs centrales $\lambda = 1,5$ $m = 6$

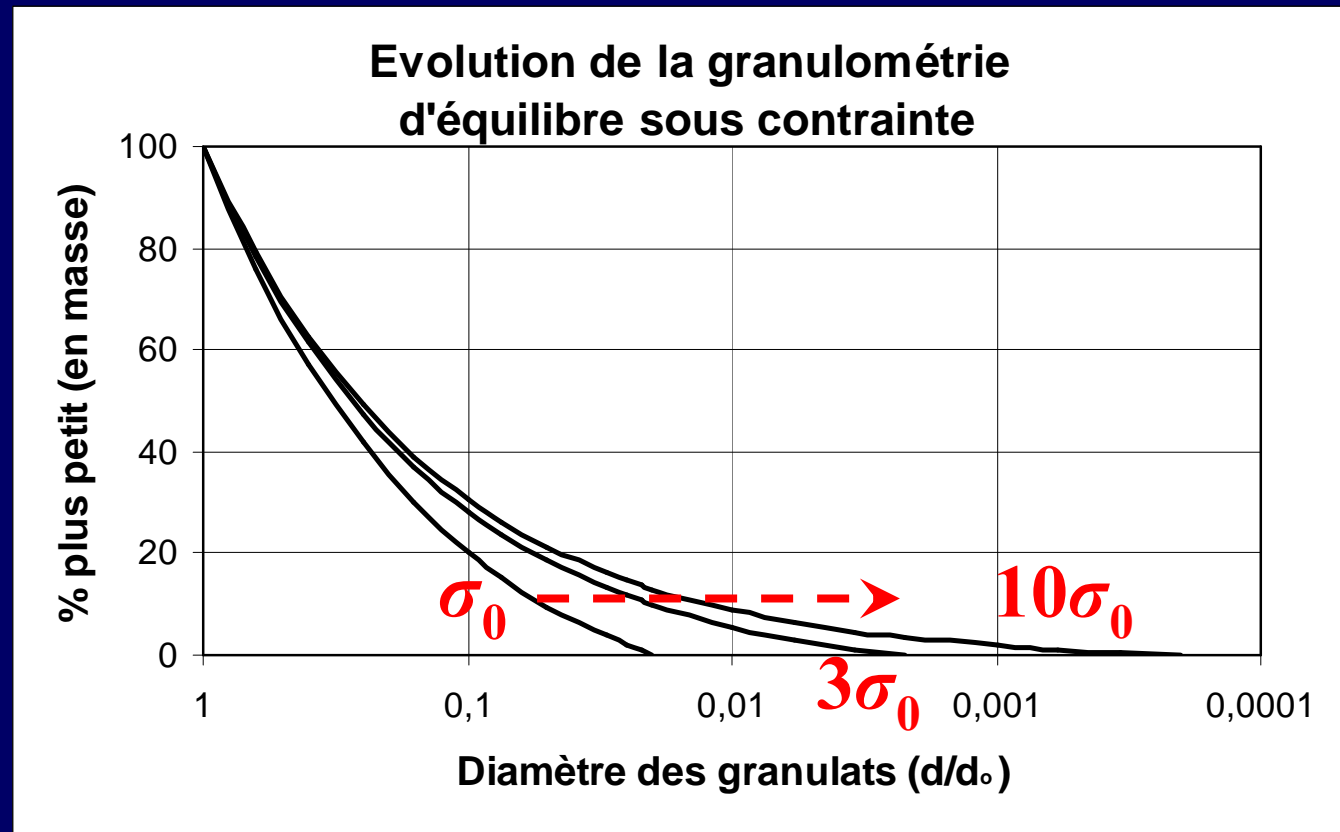
COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

3- Processus de dissipation d'énergie par rupture - **Compressibilité**

« **Processus clastique** » de Bolton & Mc Dowell (1998):

-a) Distribution des défauts: distribution centrale; contrainte moyenne dans les granulats: en proportion de la contrainte macroscopique moyenne

-b) Granulométrie d'équilibre: fractal tronqué, de dimension 2,5 env.



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

3- Processus de dissipation d'énergie par rupture Compressibilité

Le « **Processus clastique** » de Bolton & Mc Dowell (1998):

-c) ruptures → terme de création d'énergie de surface dans le bilan

{Puissance des efforts intérieurs} =

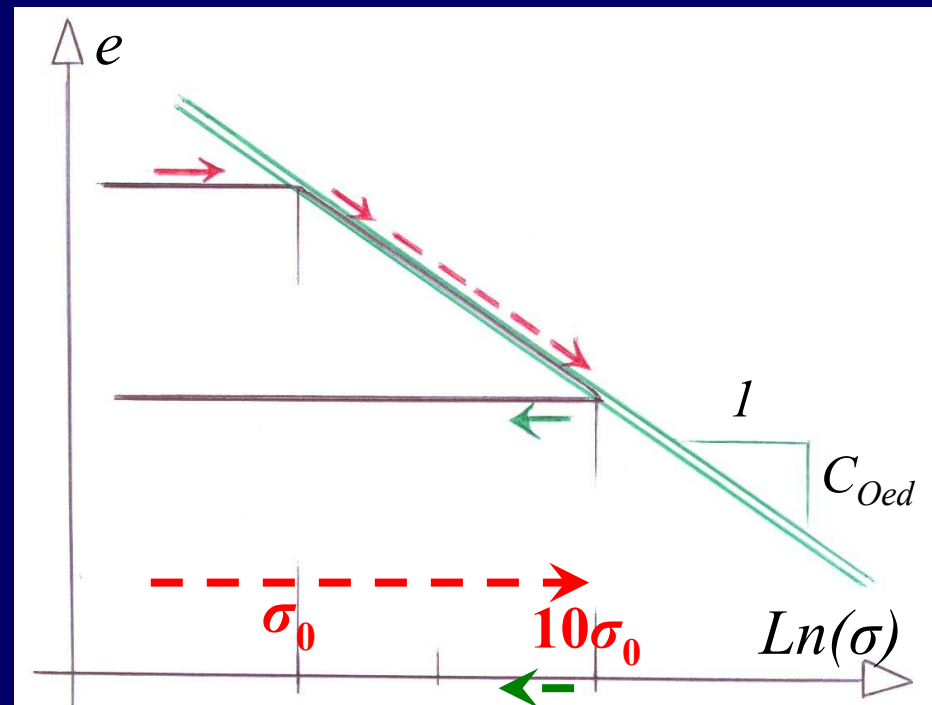
{Puissance dissipée par friction} + {Création d'énergie de surface}

→ Sollicitations

oedométriques: le Processus Clastique est intégrable avec le processus de dissipation par friction,

→ relation linéaire explicite:

$$\delta e = -C_{Oed} \cdot \delta \text{Ln}(\sigma)$$



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

3- Processus de dissipation d'énergie par rupture Compressibilité

Ordres de grandeurs du coefficient de compressibilité oedométrique obtenu: cohérents avec les valeurs mesurées usuelles.



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

3- Processus de dissipation d'énergie par rupture Compressibilité

Journée Technique CFGB-CFGL-CFMR-CFMS- 2 Février 2006



3- Processus de dissipation d'énergie par rupture

Effets d'échelle



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

3- Processus de dissipation d'énergie par rupture Effets d'échelle

Compilation de Leps (1970)

Frottement interne/
Contrainte normale

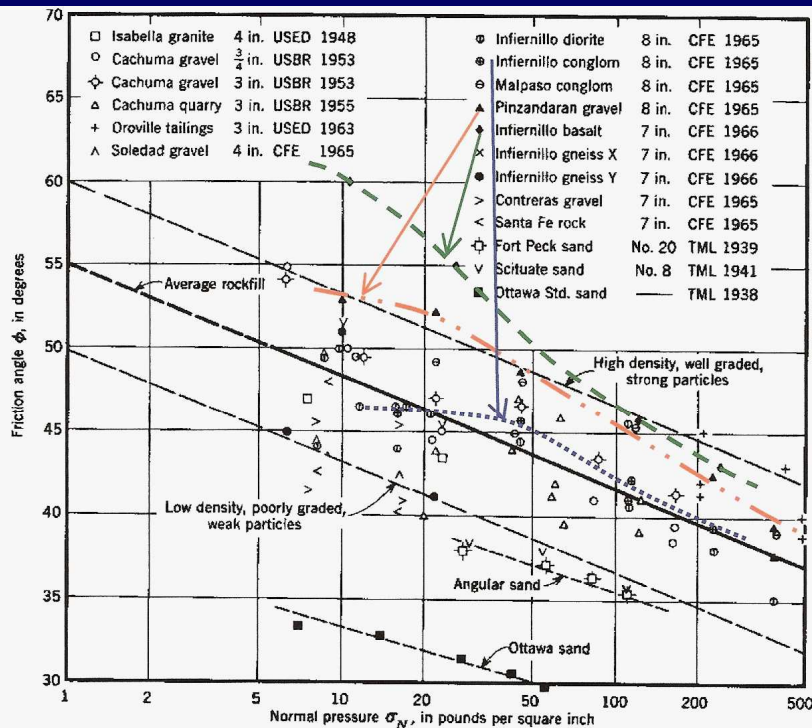
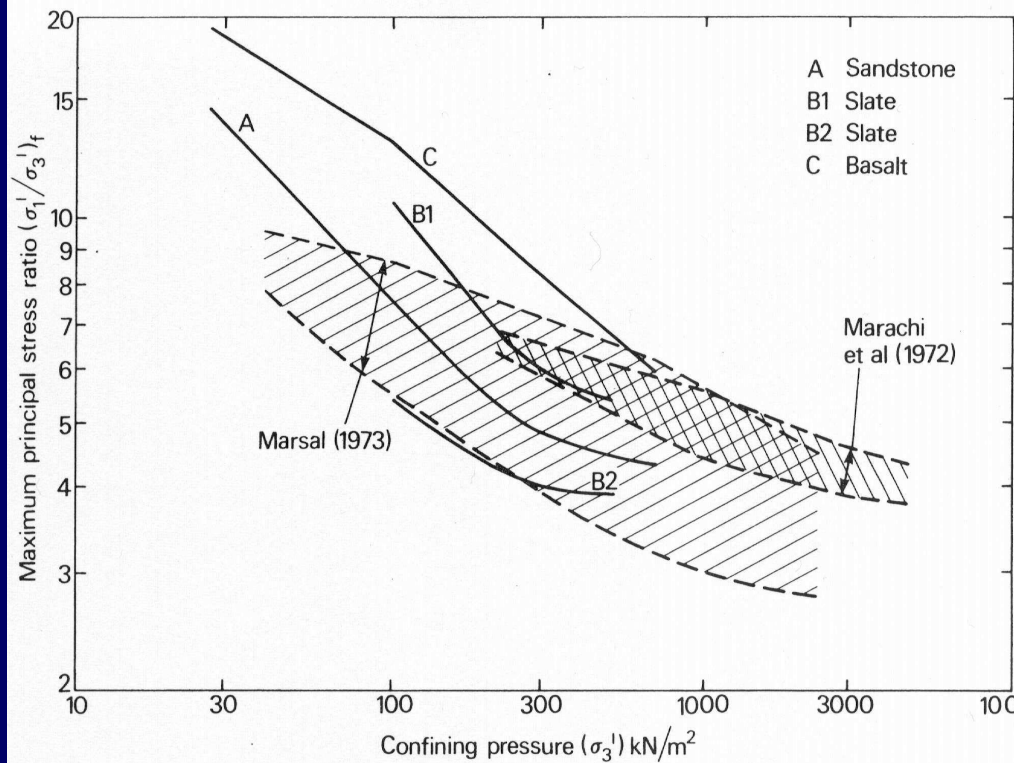


FIG. 1.—SHEARING STRENGTH OF ROCKFILL FROM LARGE TRIAXIAL TESTS
(1 Mpa = 145 psi)

Compilation de Charles & Watts (1980)

Frottement interne/
Contrainte confinement



Influence of confining pressure (σ_3') on maximum principal stress ratio (σ_1'/σ_3')

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

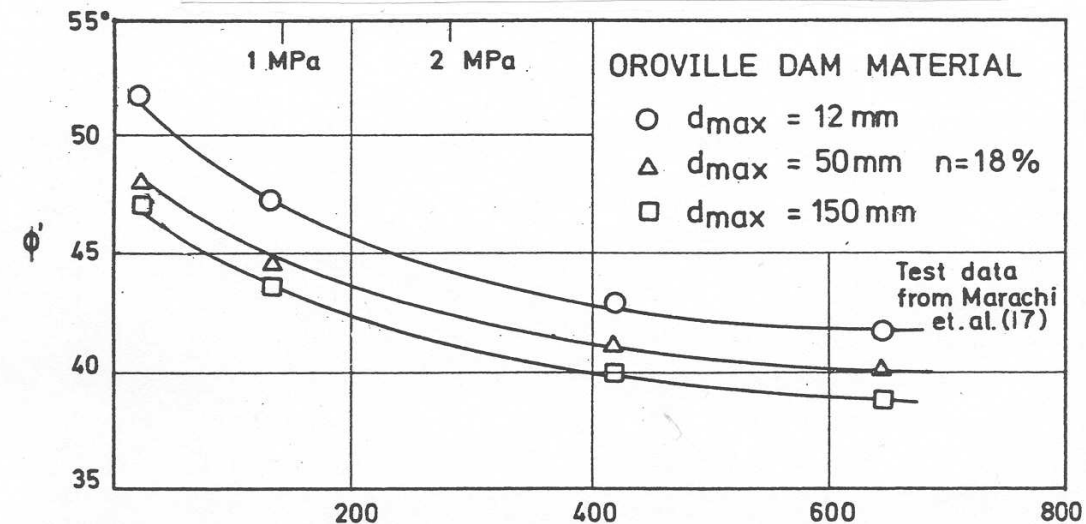
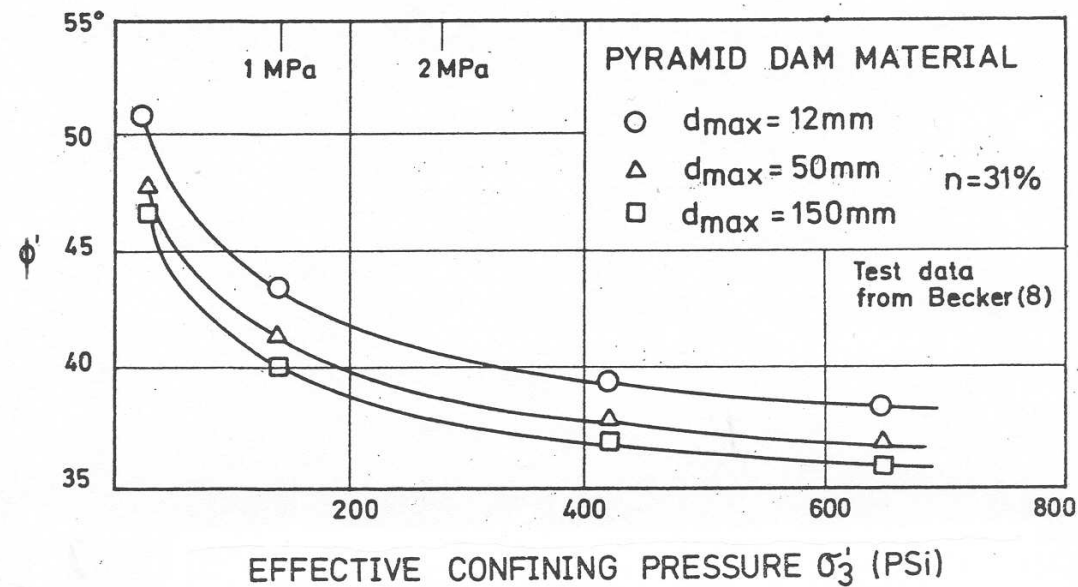
3- Processus de dissipation d'énergie par rupture

Effets d'échelle

Effet de la contrainte de confinement sur le frottement interne (2)

Compilation de Barton (1981)

1 MPa = 145 psi



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

3- Processus de dissipation d'énergie par rupture Effets d'échelle

- Essais rapportés par Barton: série de matériaux de même nature, plus grands granulats de diamètre caractéristiques 12, 50, et 150 mm., granulométries préparées pour être semblables.
- Similitude complète sur les granulométries → résistance à la rupture des granulats selon le « *Processus Clastique* »: proportionnelle à l'inverse de la racine carrée du diamètre caractéristique des plus gros granulats (ou des plus petits).

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

3- Processus de dissipation d'énergie par rupture Effets d'échelle

→ pour obtenir avec un milieu 2 de diamètre caractéristique d_2 , la même résistance qu'avec le milieu 1 de diamètre caractéristique d_1 déjà testé sous une contrainte de confinement S_1 , il faudra soumettre le milieu 2 à une contrainte de confinement S_2 :

$$S_2 = S_1 \sqrt{\frac{d_2}{d_1}}$$

→ la courbe de résistance au cisaillement fonction du confinement pour $d=150\text{mm}$ se déduirait par simple affinité géométrique de la courbe obtenue pour $d=12\text{mm}$, soit un facteur d'affinité sur les abscisses:

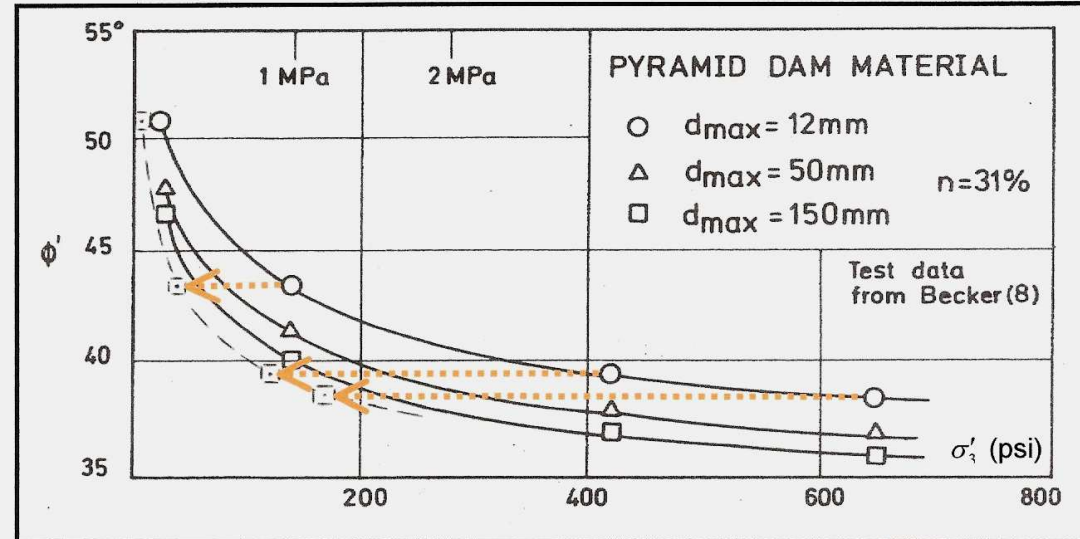
$$\sqrt{\frac{150}{12}} = 3.54$$

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

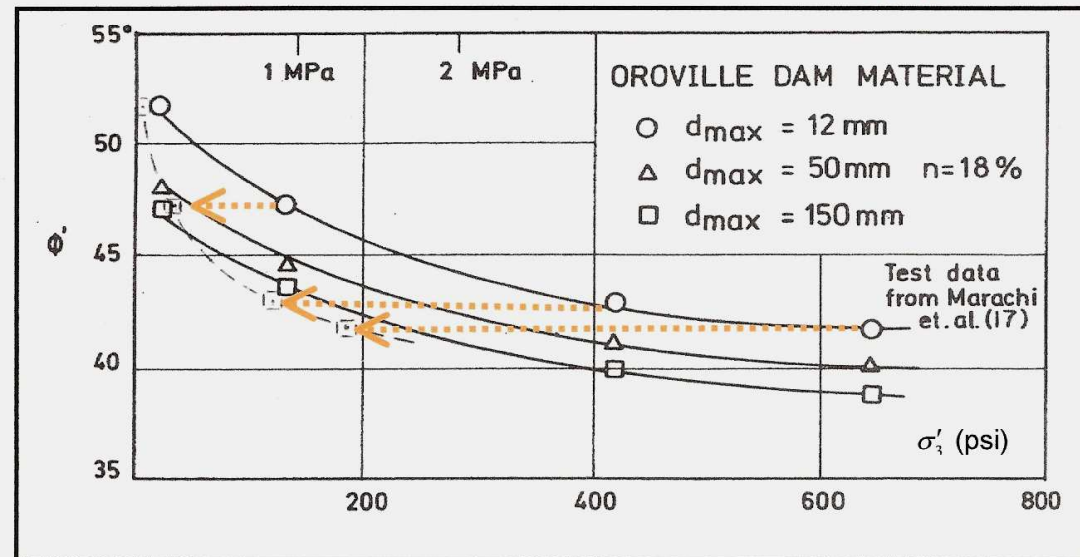
3- Processus de dissipation d'énergie par rupture

Effets d'échelle

Correction de granulométrie sur la
Compilation de Barton (1981)



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



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

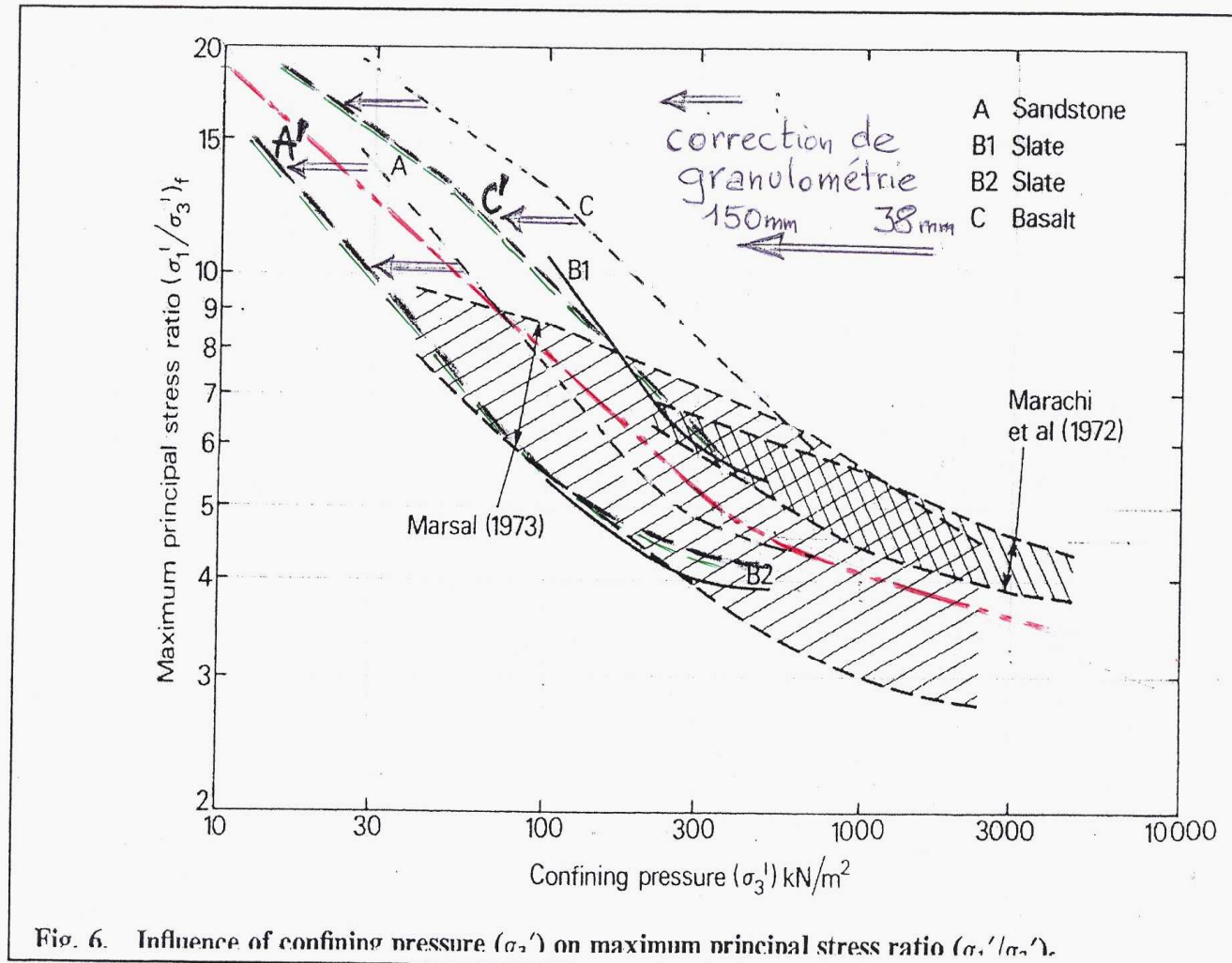
3- Processus de dissipation d'énergie par rupture

Effets d'échelle

Correction de granulométrie

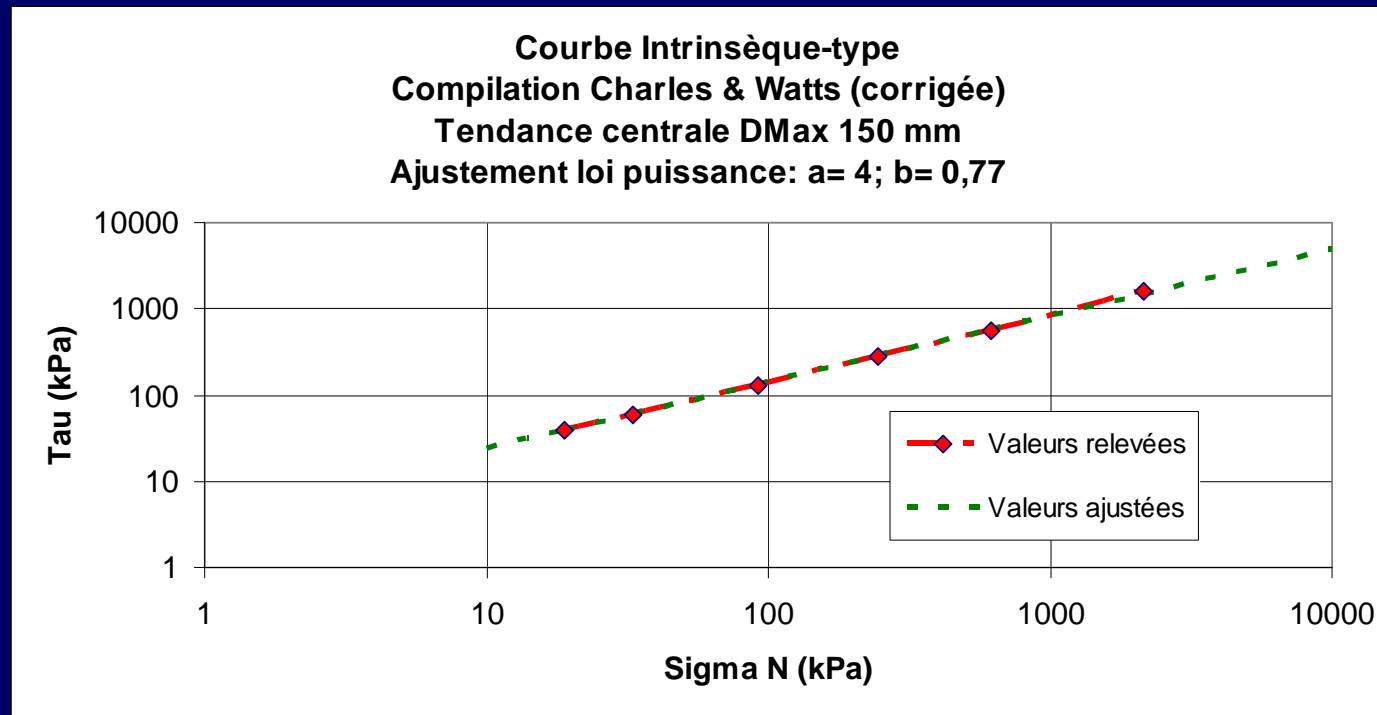
Compilation de Charles & Watts (1980)

Journée Technique CFGB-CFGL-CFMR-CFMS- 2 Février 2006



COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

3- Processus de dissipation d'énergie par rupture Effets d'échelle



$$\tau \approx 4 \cdot \sigma_n^{0,77} \quad \tau \text{ et } \sigma_n \text{ en kPa}$$

Intégration de l'effet d'échelle ?

Avec correction de distribution de Weibull?

3- Processus de dissipation d'énergie par rupture / Effets d'échelle

→ Règle d'effet d'échelle sur la courbe intrinsèque

- deux milieux granulaires de même nature minérale, de **granulométries semblables** G0 et G1, caractérisées par « diamètre caractéristique » D0 et D1;

-si la courbe intrinsèque du milieu granulaire G0, est :

$$\tau_{G0}(\sigma_n) = a_{G0} \cdot \sigma_n^b$$

-alors la courbe intrinsèque du milieu granulaire G1, dans les mêmes conditions de compacité initiale, sera:

$$\tau_{G1}(\sigma_n) = \left(\frac{D_0}{D_1} \right)^{\frac{3(1-b)}{m}} \tau_{G0}(\sigma_n) = a_{G0} \cdot \left(\frac{D_0}{D_1} \right)^{\frac{3(1-b)}{m}} \cdot \sigma_n^b$$

COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROCHEMENTS

3-Processus de dissipation d'énergie par rupture / Effets d'échelle

→ Démarche expérimentale, pour un enrochement donné

- Essais d'écrasement de granulats en fonction de leur diamètre (par exemple 25 granulats x 6 diamètres bien contrastés)
 - paramètre m (distribution Weibull)
- Détermination de la courbe intrinsèque sur granulométrie réduite G_0 , sur appareil « triaxial » classique, diamètre éprouvette ~240mm, acceptant milieu à granulométrie étalée jusqu'à $D_{Max}=40mm$, masse d'éprouvette de l'ordre de 50 kg .

Facteur de similitude géométrique limité à 15 dans la Règle d'effet d'échelle → procédure permet déjà d'évaluer la courbe intrinsèque d'enrochements jusqu'à $D_{Max}=600\text{ mm}$, gamme de matériaux représentative de la plupart des situations rencontrées dans la pratique.

Conclusions



Merci pour votre attention...