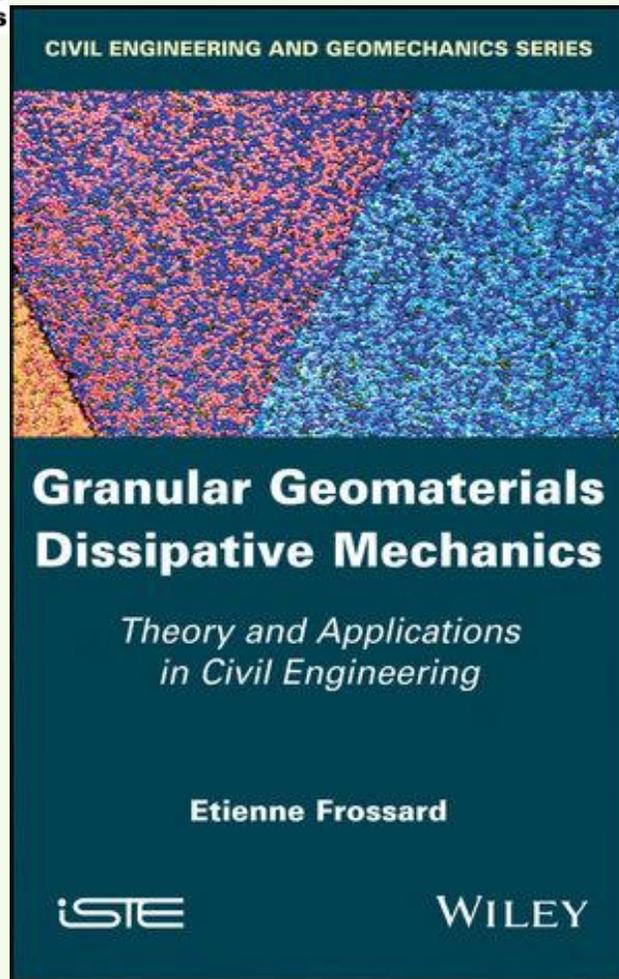


LA MECANIQUE DISSIPATIVE DES GÉOMATÉRIAUX GRANULAIRES ET SES APPLICATIONS PRATIQUES EN GENIE CIVIL

Etienne FROSSARD Expert Indépendant



Barrage de Tuni (Bolivia)
Photo EFD/ Tractebel
Engineering

- *Des milieux essentiellement dissipatifs...=> « résistance mécanique » = demande en énergie/dissipation*
- *2 processus dissipatifs: friction de contact (Coulomb), rupture des granulats (rupture fragile)*

Plan

- 1- Contexte –Hypothèses-clé
- 2- Structures physiques induites par la friction de contact
- 3- Compatibilité avec l'hétérogénéité mécanique et la localisation
- 4- Bases micromécaniques du « Critère de Coulomb »
- 5- Couplage entre résistance au cisaillement et variations de volume
- 6- Validations expérimentales
- 7- Compaction cyclique sous petites déformations
- 8- Equilibre géostatique: le « coefficient K_0 »
- 9- Effets d'échelle dus à la rupture des granulats: *applications pratiques
à la conception et la construction*

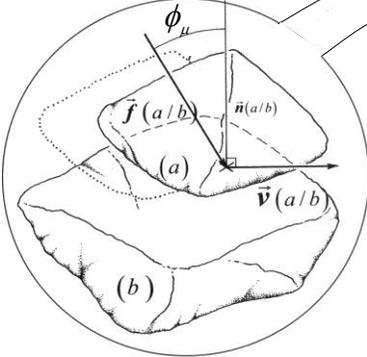
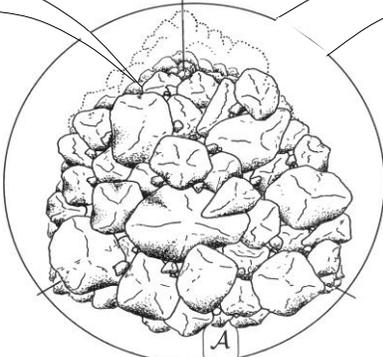
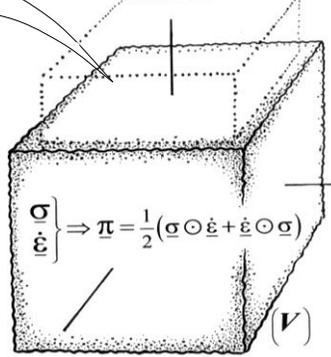
1- Contexte-Hypothèses-clé



Le Barrage de Mazar (Ecuador), et l'enrochement utilisé pour sa construction – Photos EFD et C.A.Ramirez /Tractebel Engineering

- *De grands ouvrages mettant en œuvre des quantités considérables*
- *Un certain empirisme => Sérieux incidents => nécessité de progression rationnelle*
- *Granulats minéraux rigides, formes irrégulières convexes, friction de contact*
- *Mouvements des contacts: essentiellement en glissements relatifs*

2- Structures physiques induites par la friction de contact

| 1] DOM. MATERIEL (en mouvt.) | CONTACT ELEMENTAIRE | AMAS GRANULAIRE | CONTINUUM EQUIVALENT |
|---|--|---|--|
| <i>Echelle</i> | <i>Microscopique</i> | <i>Méso-scopique</i> | <i>Macroscopique</i> |
| |  |  |  |
| 2] ACTIONS INTERIEURES (Tenseurs symétriques 2 nd ordre) | $\mathbf{p}(a/b) = \frac{1}{2} \{ \vec{f} \otimes \vec{v} + \vec{v} \otimes \vec{f} \}$ | $\mathbf{P}(A) = \sum_{A \text{ tm} < b \leq N} \mathbf{p}(a/b)$ | $\boldsymbol{\pi} = \frac{1}{2} \{ \boldsymbol{\sigma} \otimes \dot{\boldsymbol{\epsilon}} + \dot{\boldsymbol{\epsilon}} \otimes \boldsymbol{\sigma} \} \text{ contracté}$ |
| <i>Puissance efforts intérieurs</i> | $\dot{W}(a/b) = \vec{f} \cdot \vec{v} = \text{Tr} \{ \mathbf{p}(a/b) \}$ | $\dot{W}(A) = \sum_A \dot{W}(a/b) = \sum_A \vec{f} \cdot \vec{v} = \text{Tr} \{ \mathbf{P}(A) \}$ | $\dot{w} = \sum_{i,j} \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} = \text{Tr} \{ \boldsymbol{\pi} \}$ |
| 3] DISSIPATION D'ENERGIE due à la friction | $\text{Tr} \{ \mathbf{p}(a/b) \} = \sin \phi_\mu \cdot N \{ \mathbf{p}(a/b) \}$ avec $\begin{cases} N \{ \mathbf{p} \} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \mathbf{p}_3 = \ \vec{f}\ \cdot \ \vec{v}\ \\ \{ \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3 \} \text{ valeurs propres de } \mathbf{p}(a/b) \end{cases}$ | $\text{Tr} \{ \mathbf{P}(A) \} = \sin \phi_\mu^* \cdot N \{ \mathbf{P}(A) \}$ avec $R(A) = \frac{1}{(1 - \sin \phi_\mu)} \cdot \left[1 - \frac{N \left\{ \sum_A \mathbf{p}(a/b) \right\}}{\sum_A N \{ \mathbf{p}(a/b) \}} \right]$ Vérifie $0 \leq R(A) \leq 1$ | $\text{Tr} \{ \boldsymbol{\pi} \} = \sin \phi_\mu^* \cdot N \{ \boldsymbol{\pi} \}$ En cas de coaxialité, résulte en : $\sum_i \sigma_i \dot{\epsilon}_i = \sin \phi_\mu^* \cdot \sum_i \sigma_i \dot{\epsilon}_i $ |

Friction de Coulomb => la dissipation d'énergie s'exprime sur les tenseurs d'«actions intérieures», portant la puissance des efforts intérieurs en 1^{er} Invariant

2- Structures physiques induites par la friction de contact: échelle microscopique

=> écriture de la dissipation de friction de Coulomb avec les actions intérieures de contact

- Effort de contact et vitesse de glissement \vec{f}, \vec{v}

→ **Dissipation par friction**
(Coulomb)

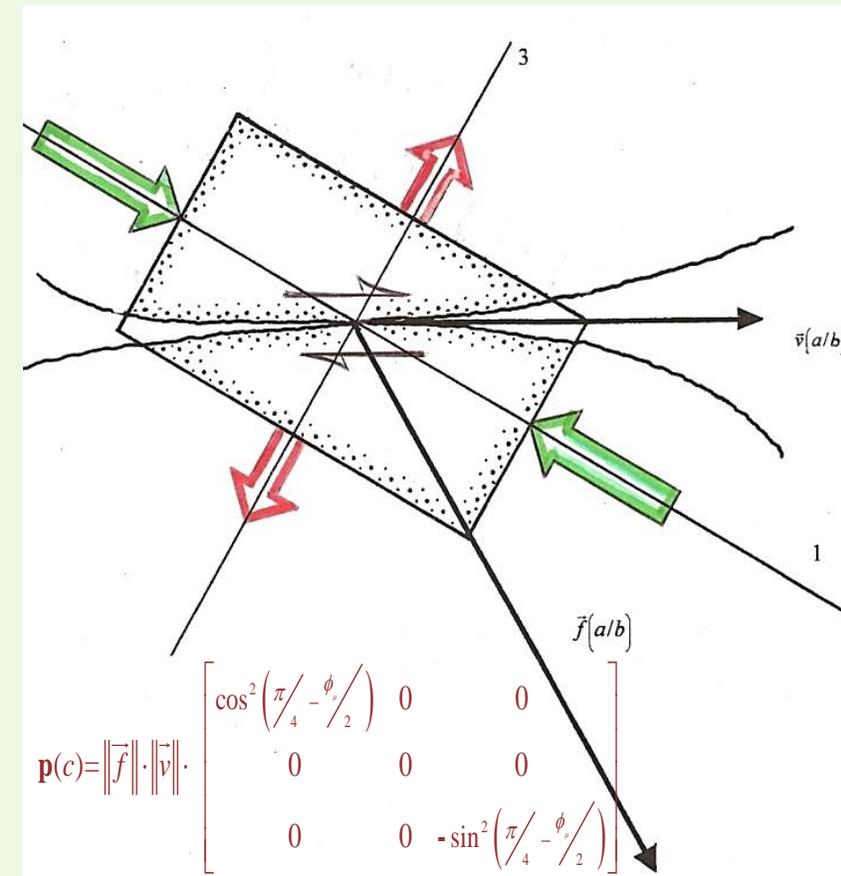
$$\vec{f} \cdot \vec{v} = \sin \phi_{\mu} \cdot \|\vec{f}\| \cdot \|\vec{v}\|$$

- Actions Intérieures de contact $\mathbf{p}(c)$:

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

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

→ **Dissipation par friction** $Trace\{\mathbf{p}(c)\} = \sin \phi_{\mu} \cdot N\{\mathbf{p}(c)\}$



2- Structures physiques induites par la friction de contact: échelle mésoscopique

=> effets de population et « Règle de moindre dissipation »

| | Hodographe des glissements de contact | Signature du tenseur P | Cercles de Mohr du tenseur P | Déformations macroscopiques |
|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| MODE I | | | | |
| DEFORM. PLANE Mode frontière | | | | |
| MODE II | | | | |

- => Modes de dissipation minimale, correspondances micro-macro

2- Structures physiques induites par la friction de contact: échelle macroscopique

Relation de dissipation du continuum équivalent

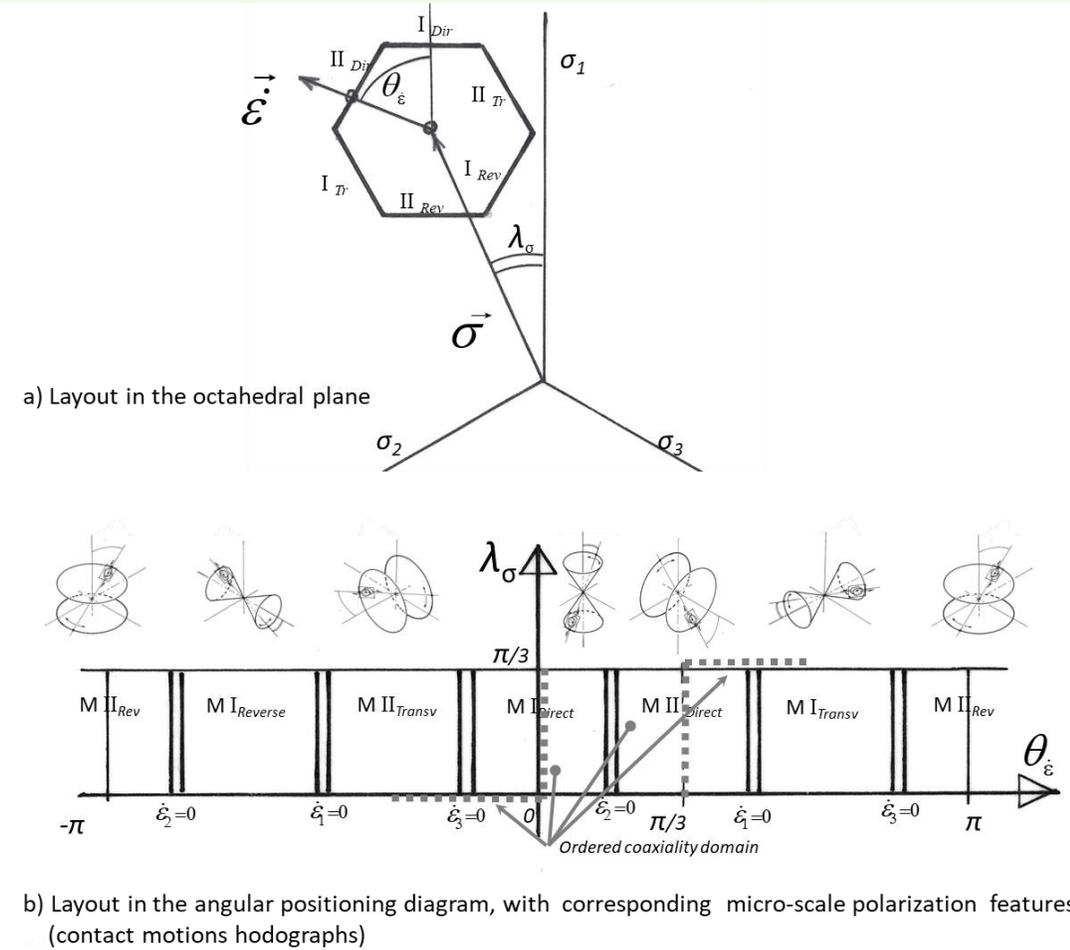
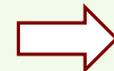
$$\sum_i \sigma_i \dot{\epsilon}_i = \sin \phi_\mu^* \cdot \sum_i |\sigma_i \dot{\epsilon}_i|$$

à $\underline{\sigma}$ donné :
 ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 > 0$)

↓

6 modes de déformation en proche dissipation minimale

| Désignation des Modes | Signature des valeurs propres ($\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$) | Observations |
|---------------------------|--|---------------------------------|
| Mode I <i>Direct</i> | +, -, - | Coaxialité ordonnée (en partie) |
| Mode I <i>Transverse</i> | -, +, - | -- |
| Mode I <i>Inverse</i> | -, -, + | -- |
| Mode II <i>Direct</i> | +, +, - | Coaxialité ordonnée (en partie) |
| Mode II <i>Transverse</i> | +, -, + | -- |
| Mode II <i>Inverse</i> | -, +, + | -- |

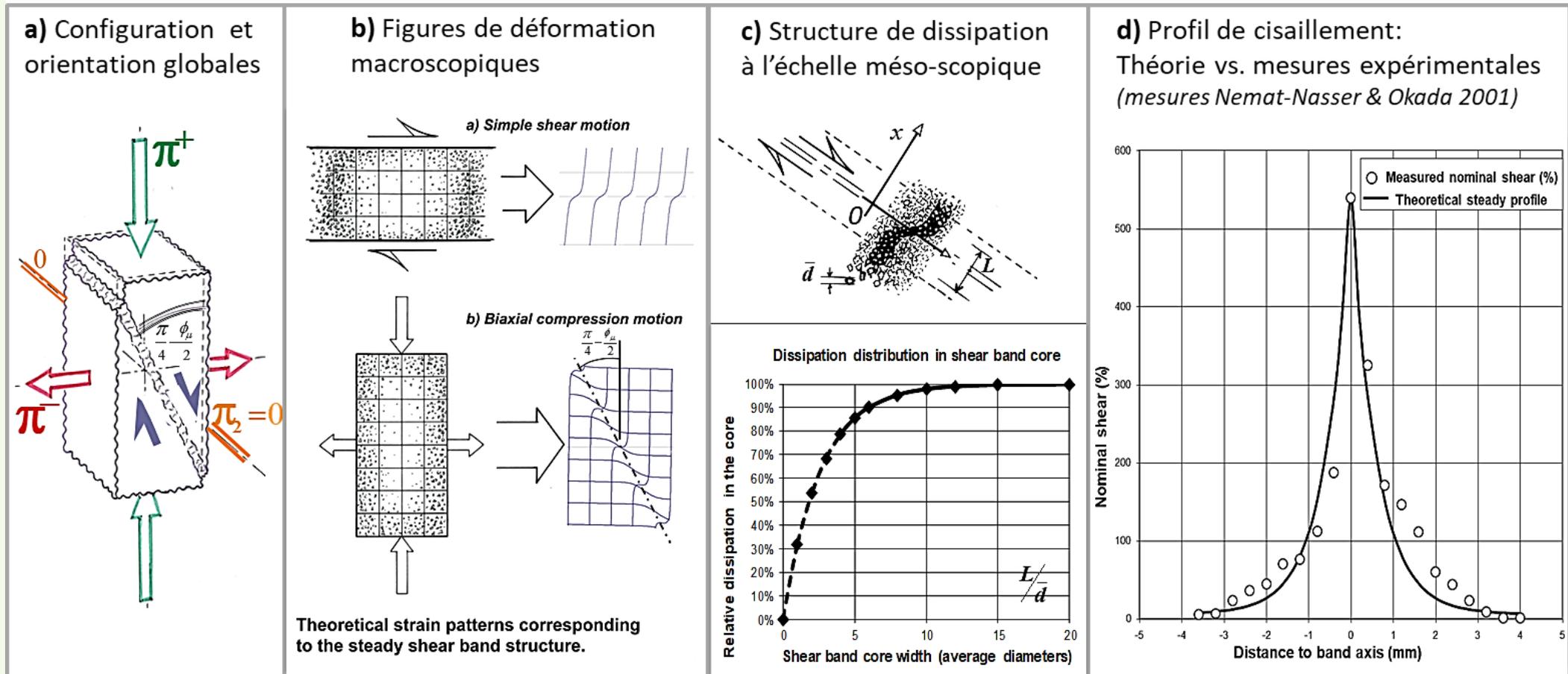


- Description 3D unifiée sans notion de « chargement/déchargement »
- Confirmé par les validations expérimentales cycliques (dia. n°13)

3- Compatibilité avec l'hétérogénéité mécanique et la localisation

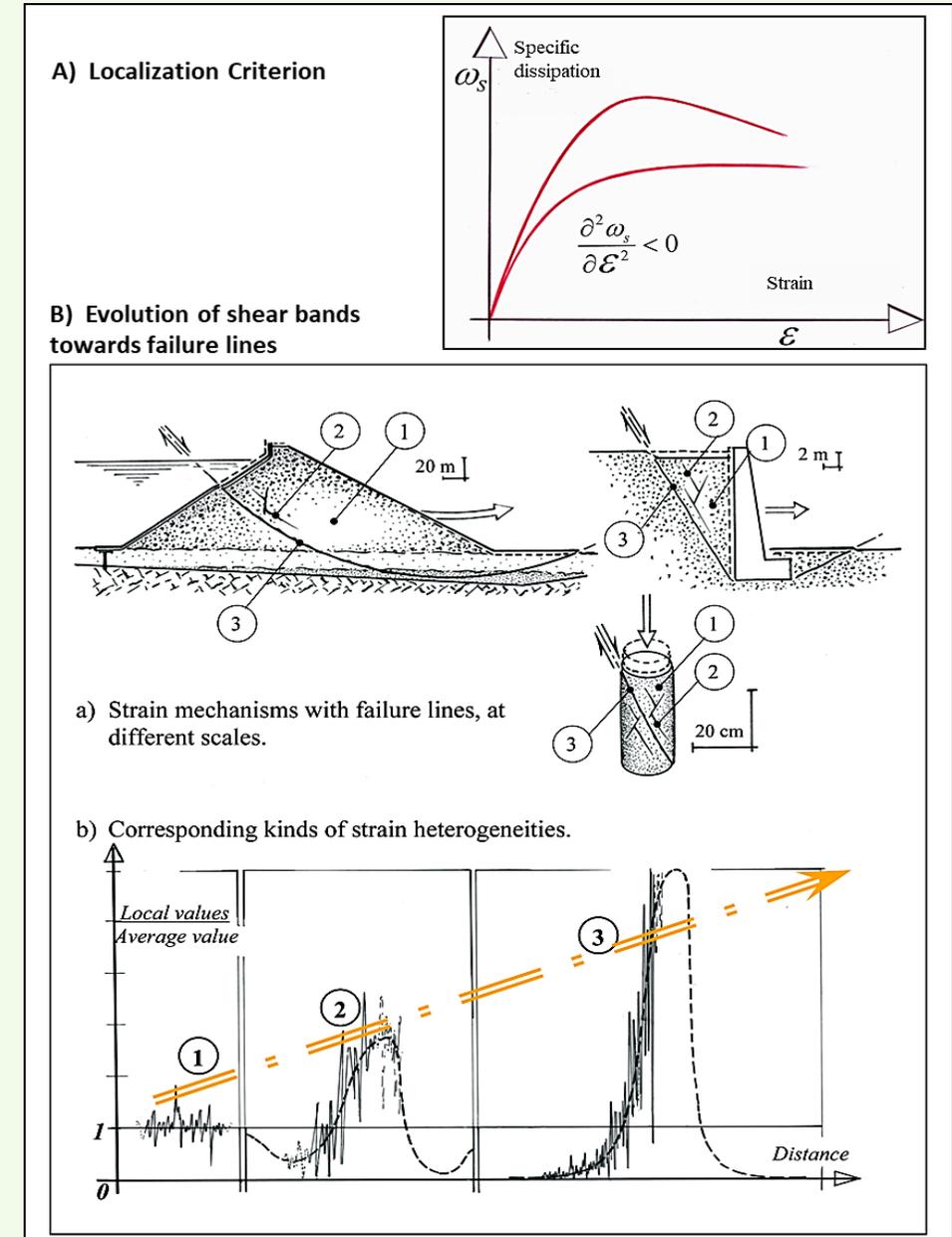
- Forte hétérogénéité mécanique: caractère inhérent à ces milieux granulaires
- Compatibilité très large de la relation de dissipation avec l'hétérogénéité des actions intérieures
- Exemple de solution hétérogène admissible: la localisation des déformations, à structure interne forte

Chambéry-30 Janvier 2020



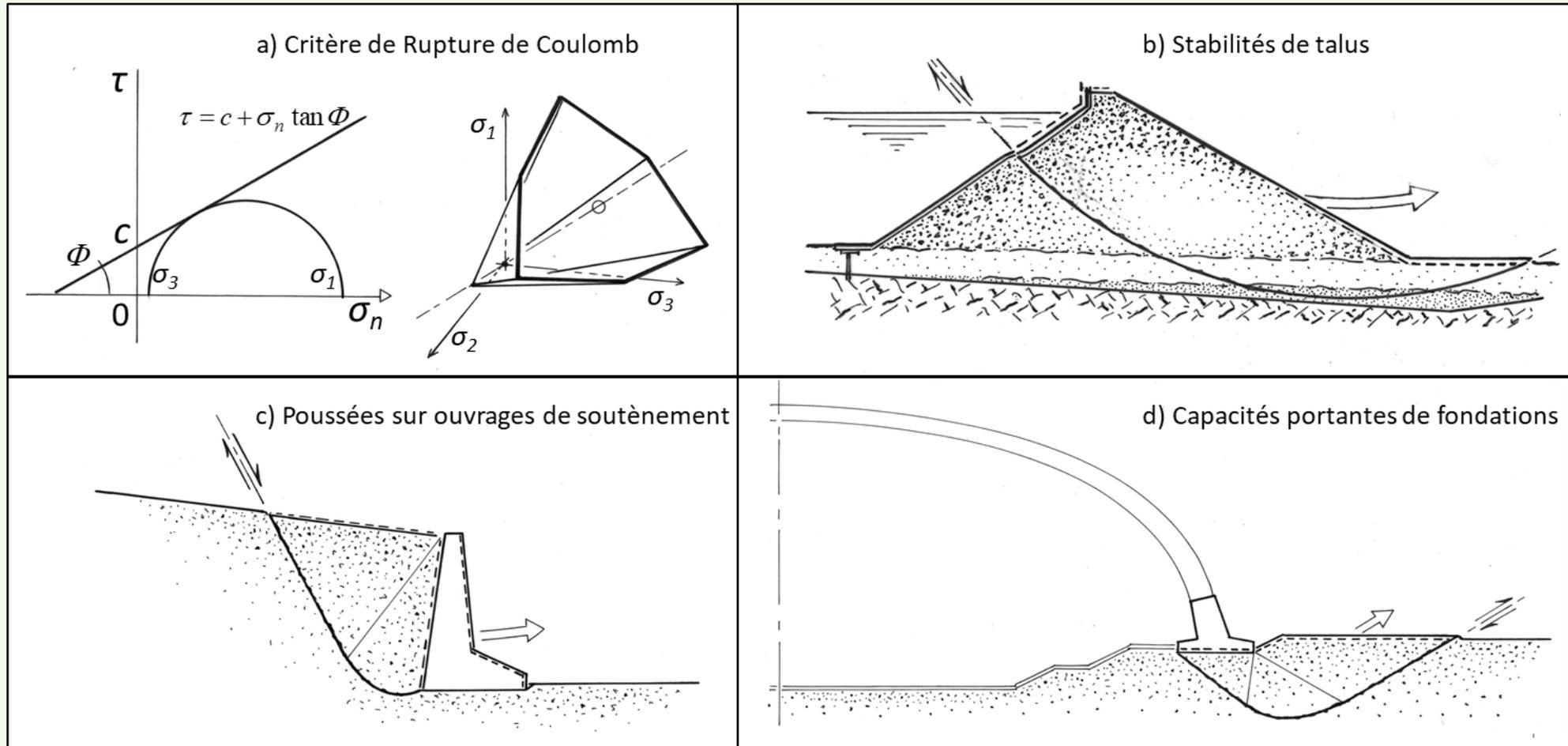
3- Compatibilité avec l'hétérogénéité mécanique et la localisation

- Critère de localisation: non-convexité de la dissipation spécifique
- Evolution des bandes de cisaillement: vers la concentration progressive en une quasi-discontinuité, c.à.d. formation d'une « ligne de rupture »
- En dépit de cette hétérogénéité et de la localisation, la relation de dissipation macroscopique demeure valide sur les grandeurs moyennes et locales, sous conditions régulières.



4- Bases micromécaniques du « Critère de Coulomb »

- Critère d'origine empirique, largement utilisé en Génie Civil dans de nombreuses situations
- Mais...sans rattachement établi avec des bases de comportement micro-mécanique



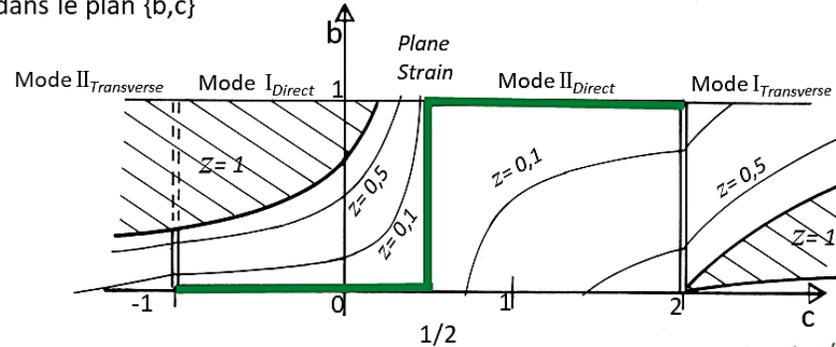
4- Bases micromécaniques du « Critère de Coulomb »

- Critère de rupture à l'état critique: relation de dissipation => solution de résistance minimale, (avec figures de polarisation des glissements de contact)

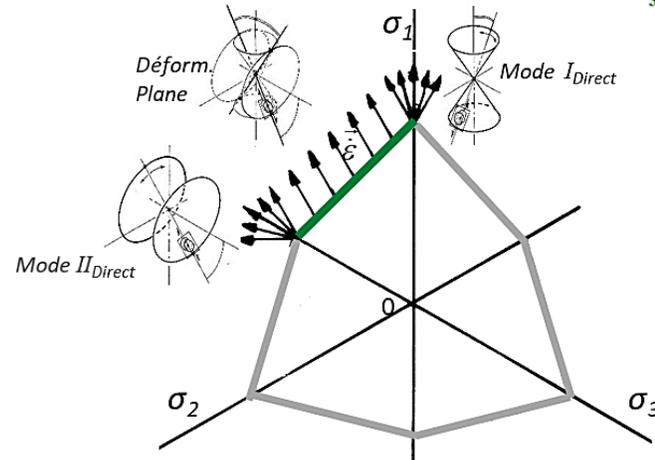
$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

$$c = \frac{\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_3}{\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_3}$$

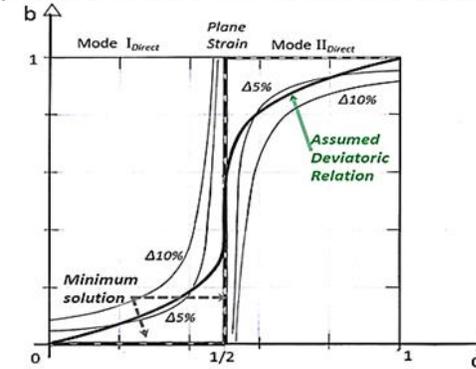
a) Résistance minimale en cisaillement: solution de « relation déviatoire » dans le plan {b,c}



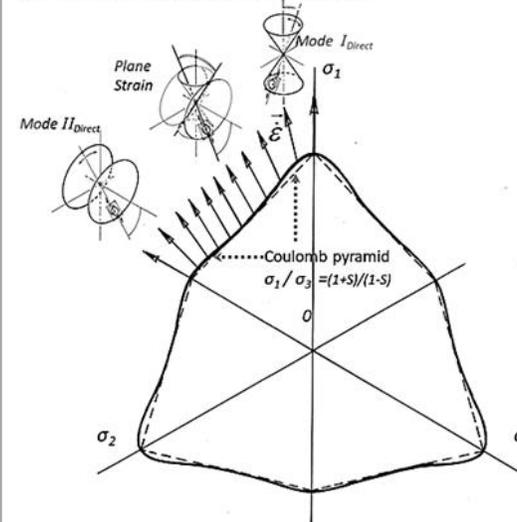
b) Section octaédrale résultante: le Critère de Coulomb $\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 + \sin \phi_\mu^*}{1 - \sin \phi_\mu^*}$



c) Hypothèse différente de "Relation déviatoire"



d) Critère de rupture résultant



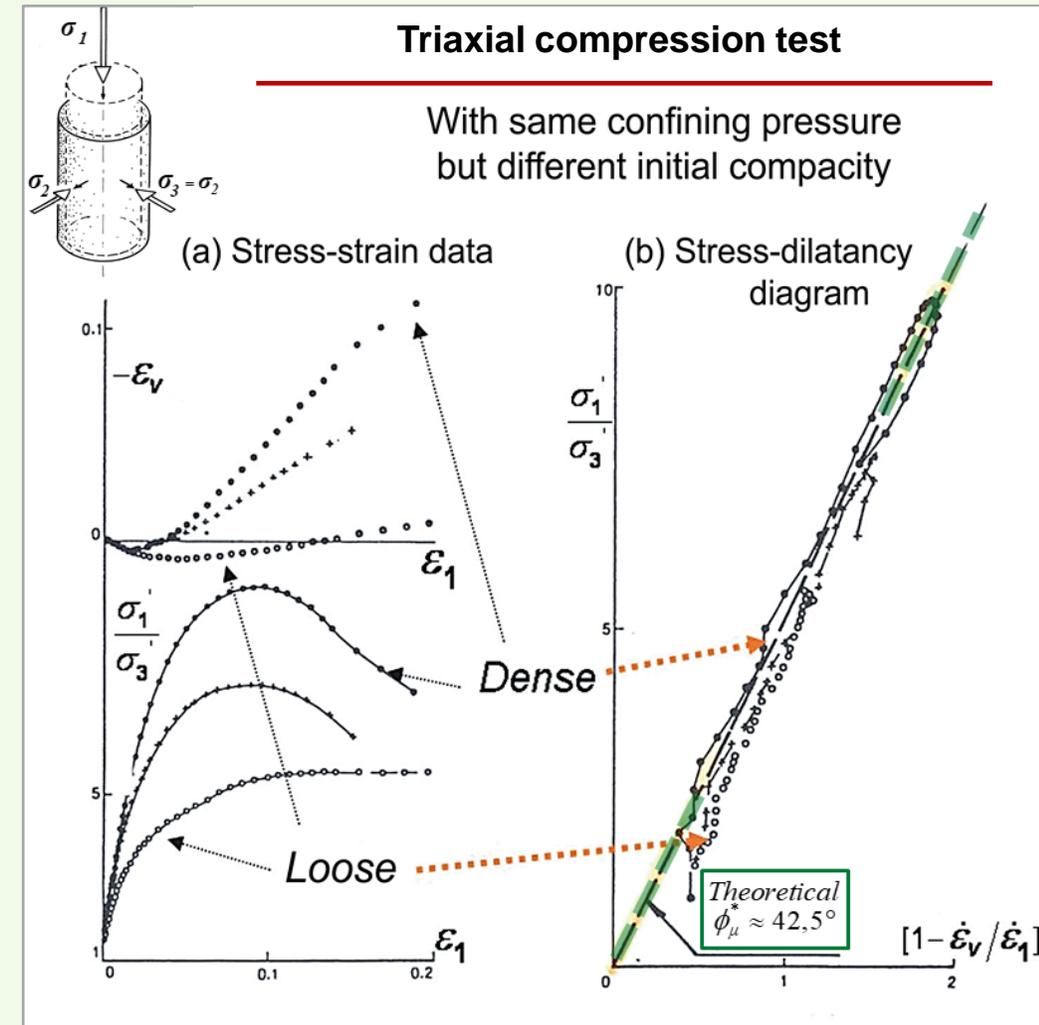
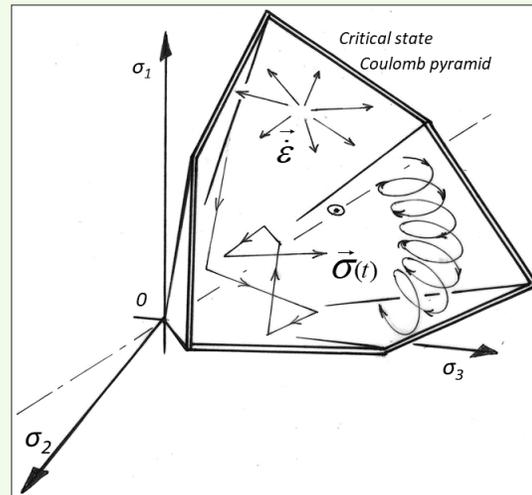
- Incidence de petites déviations

5- Couplage entre résistance au cisaillement et variations de volume

- Définition d'un « taux de dilatance » généralisé 3D
- => Relations contraintes-dilatance généralisées 3D, se réduisant aux relations de Rowe en contraintes axisymétriques ou déf. plane:
$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \left(\frac{1 + \sin \phi_\mu^*}{1 - \sin \phi_\mu^*} \right) \cdot \left(1 - \frac{\dot{\epsilon}_v}{\dot{\epsilon}_1} \right)$$

- Résistance au cisaillement avec dilatance = {critère à l'état critique} X {taux de dilatance max.}

- Existence d'un « domaine caractéristique » = intérieur du critère à l'état critique: tout mouvement y entraîne une contraction en volume



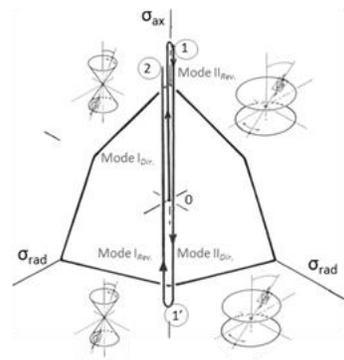
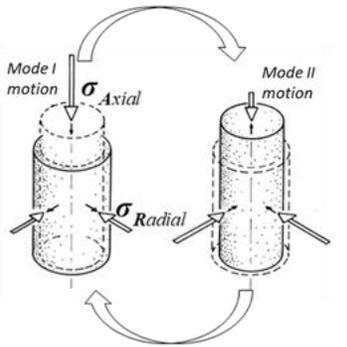
6- Validations expérimentales

Enveloppes théoriques de données d'essais cycliques, sur les diagrammes de dilatance originaux

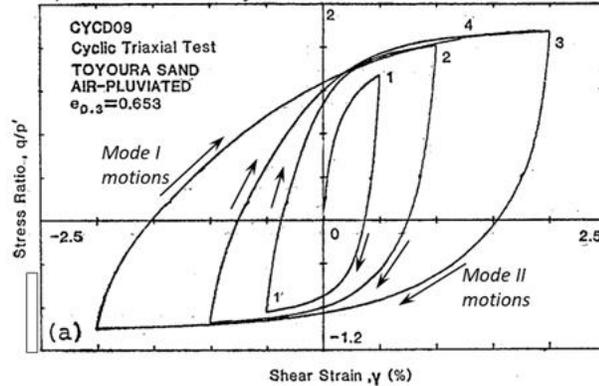
(Pradhan, Tatsuoka, Sato -1989)

A) Essai triaxial cyclique

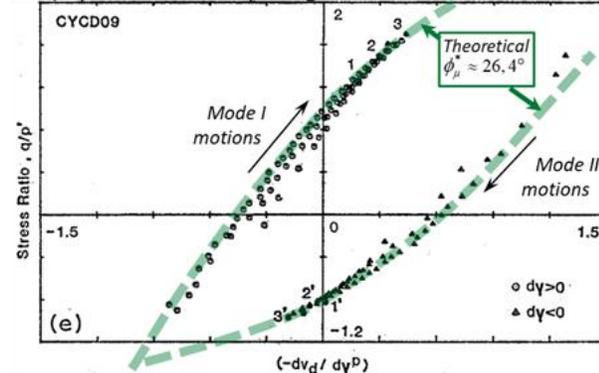
a) Cyclic motion and stress-path in octahedral plane



b) Stress-strain trajectories

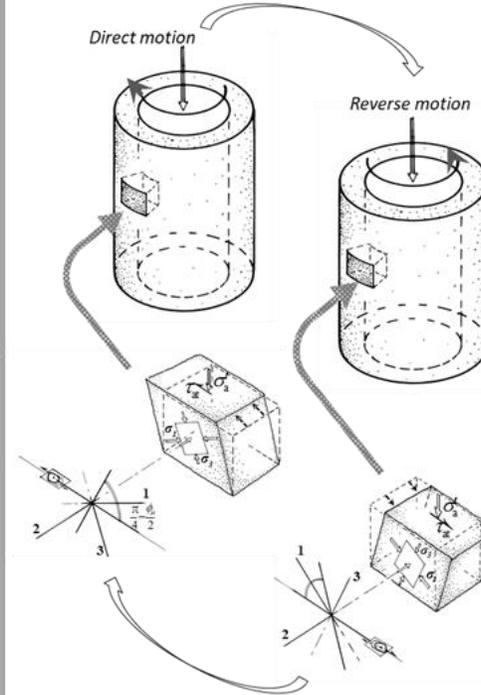


c) Specific dilatancy diagram

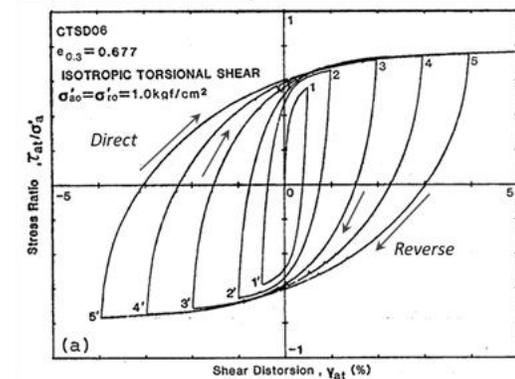


B) Essai cyclique de cisaillement en torsion (cylindre creux)

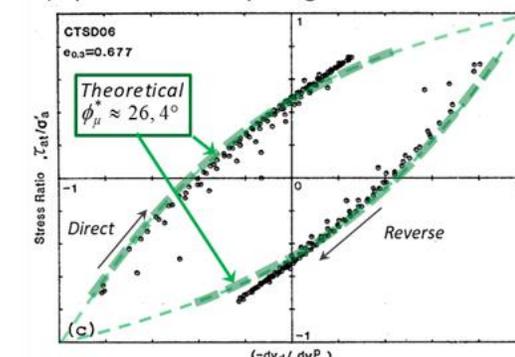
a) Cyclic motion, stresses, micro-scale polarization patterns



b) Stress-strain trajectories



c) Specific dilatancy diagram

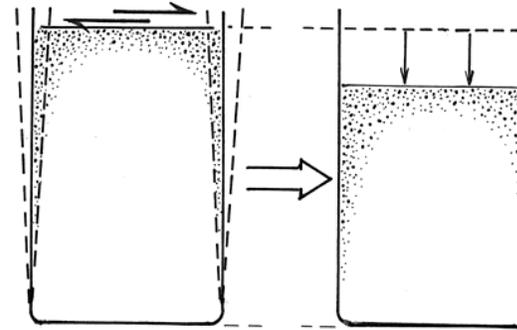


- 2 types de mouvements, différents dans leur nature (tant en micro. qu'en macro.)
- Un même paramètre matériel (indépendant de la densité) décrit les 2 types

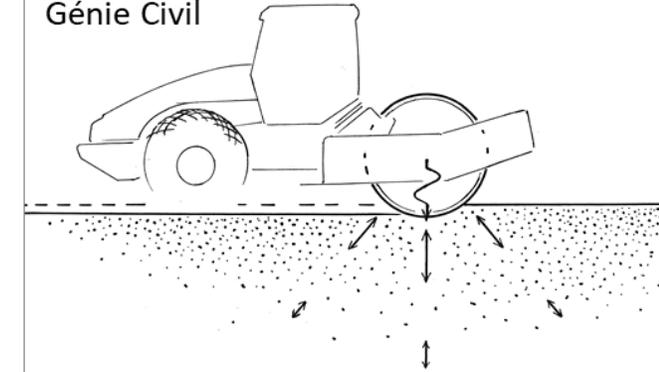
7- Compaction cyclique sous petites déformations

- *Expérience courante, mise en œuvre en Génie Civil*
- *Simulations par la relation de dissipation, petits mouvements en Déformation Plane, sous contraintes \sim constantes.*
- *Effet marqué du ratio des contraintes principales sur l'efficacité, et de la contrainte moyenne (efficacité énergétique).*
- *Correspond aux données de terrain.*

a) Expérience courante

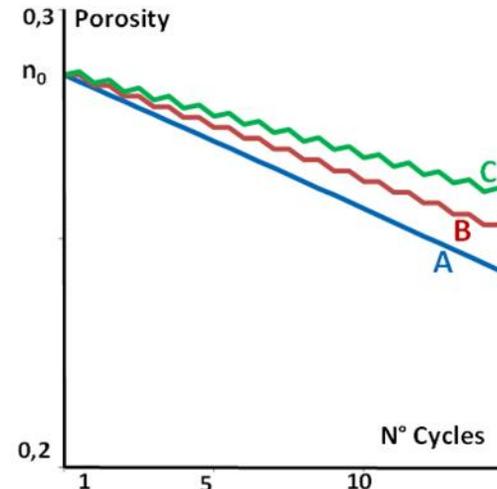


b) Pratique usuelle de compactage en Génie Civil

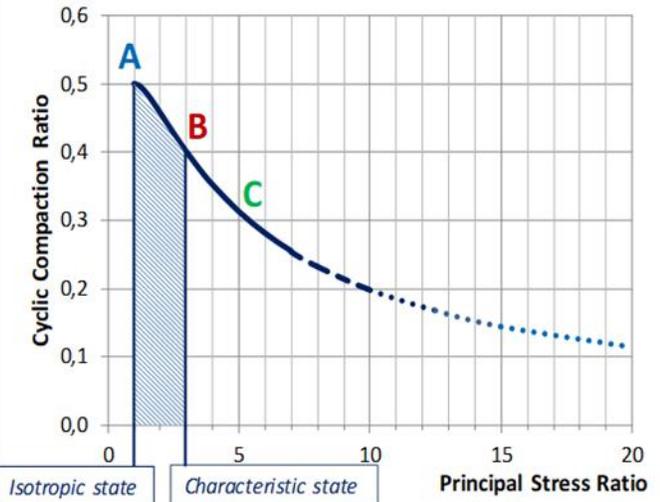


c) Résultats de modélisation analytique en cisaillement simple alterné

c1) Evolution de la porosité montrant un effet de rochet typique



c2) Ratio de compaction cyclique versus ratio des contraintes principales



8- Equilibre géostatique: le « coefficient K_0 »

Coefficient K_0 essentiel en GC pour le dimensionnement de structures souterraines

- *Solution originale au mouvement global composite associé à l'établissement des contraintes de l'équilibre géostatique*
- *Comparaison avec la formule empirique de Jaky (1948)*

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v$$

Chambéry-30 Janvier 2020

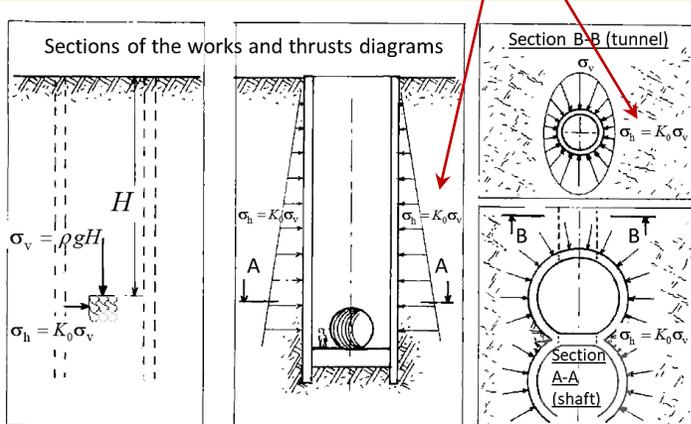
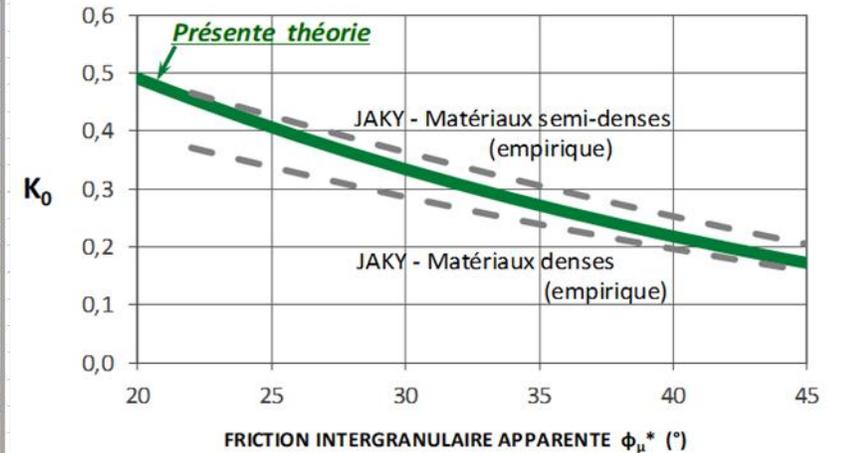
a) Travaux souterrains à faible profondeur en zone urbaine:



b) Coefficient de pression des terres au repos K_0 : l'approche dissipative multi-échelles

$$K_0 \approx \frac{1 - \sin \phi_\mu^*}{1 + \sin \phi_\mu^*}$$

K_0 VERSUS LA FRICTION INTERGRANULAIRE APPARENTE

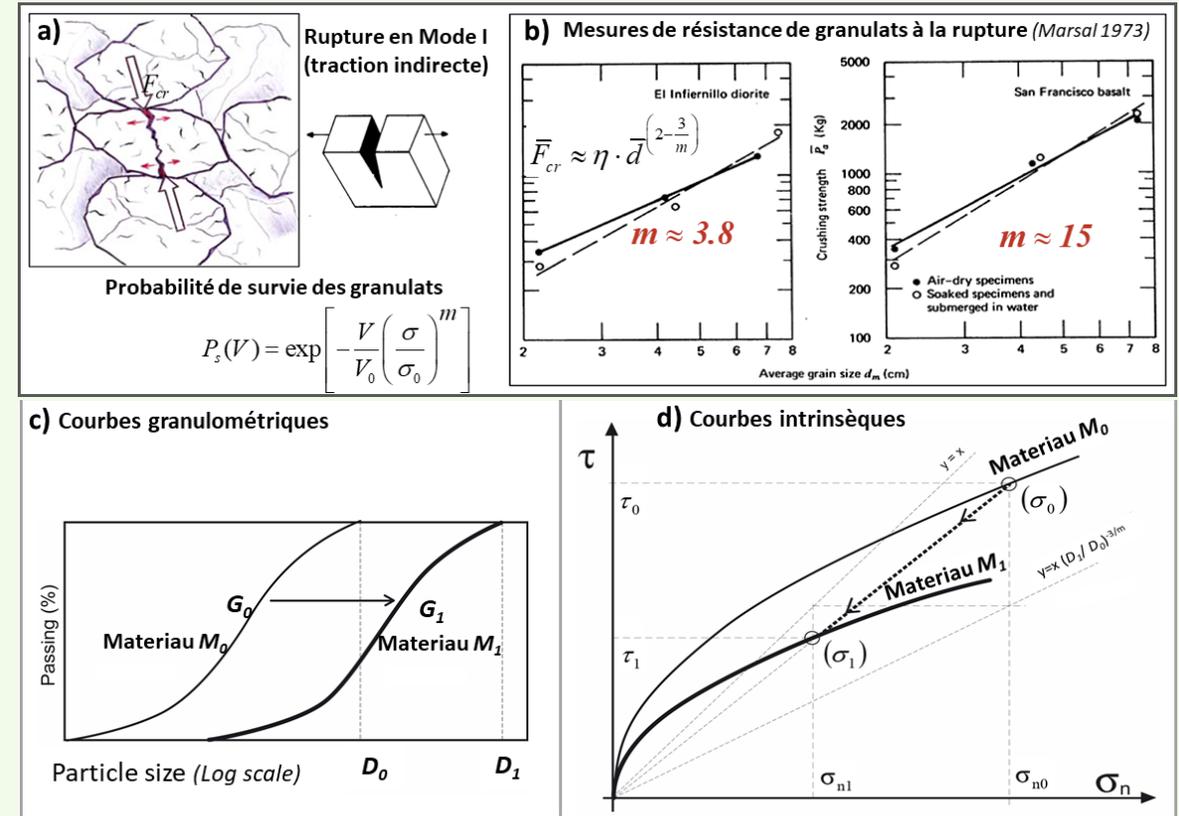


9- Effets d'échelle dus à la rupture des granulats: applications à la conception et la construction

- Physique des ruptures élémentaires, => courbure des courbes intrinsèques
- => « Règle d'Effet d'Echelle » opérant sur les courbes intrinsèques:

$$\tau_0 = f_0(\sigma_n) \Rightarrow \tau_1 = \left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{-\frac{3}{m}} \cdot f_0 \left\{ \sigma_n \cdot \left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{\frac{3}{m}} \right\}$$

- => Méthode rationnelle d'évaluation de la courbe intrinsèque de gros matériaux, à partir de matériaux « réduits »...



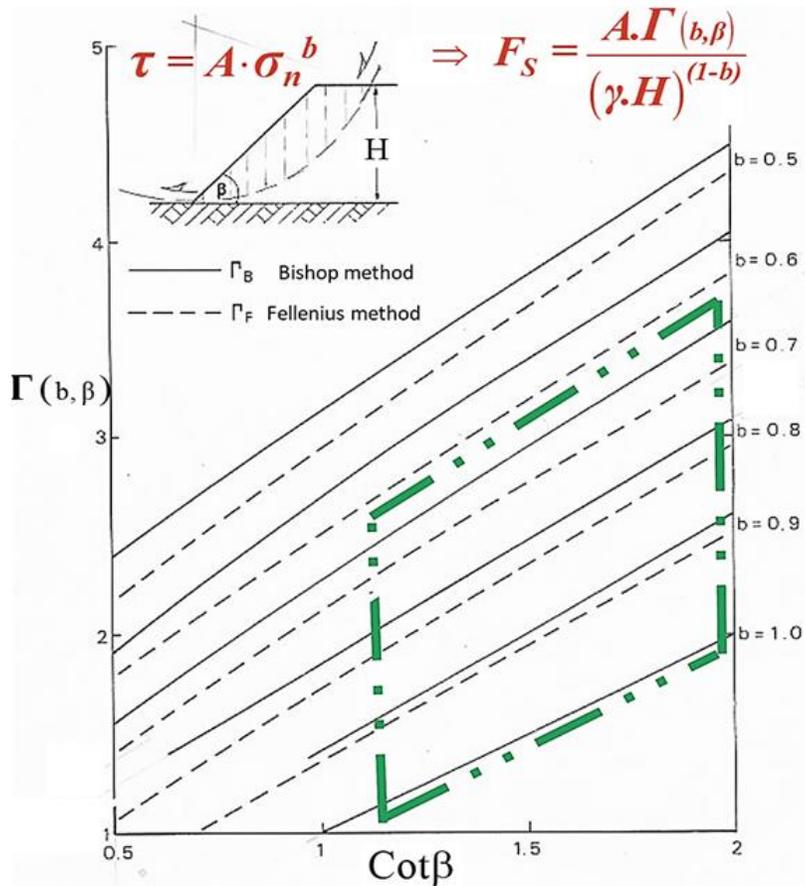
- => Tendance centrale sur large base données:

$$\begin{cases} \text{pour } D_{Max} = 0,15m & \tau \approx 3,5 \cdot \sigma_n^{0,80} & \tau, \sigma_n \text{ en kPa} \\ \text{pour } D_{Max} \neq 0,15m & \tau \approx 3,5 \cdot \left(\frac{0,15}{D_{Max}}\right)^{0,1} \cdot \sigma_n^{0,80} & \text{et } m \approx 6 \end{cases}$$

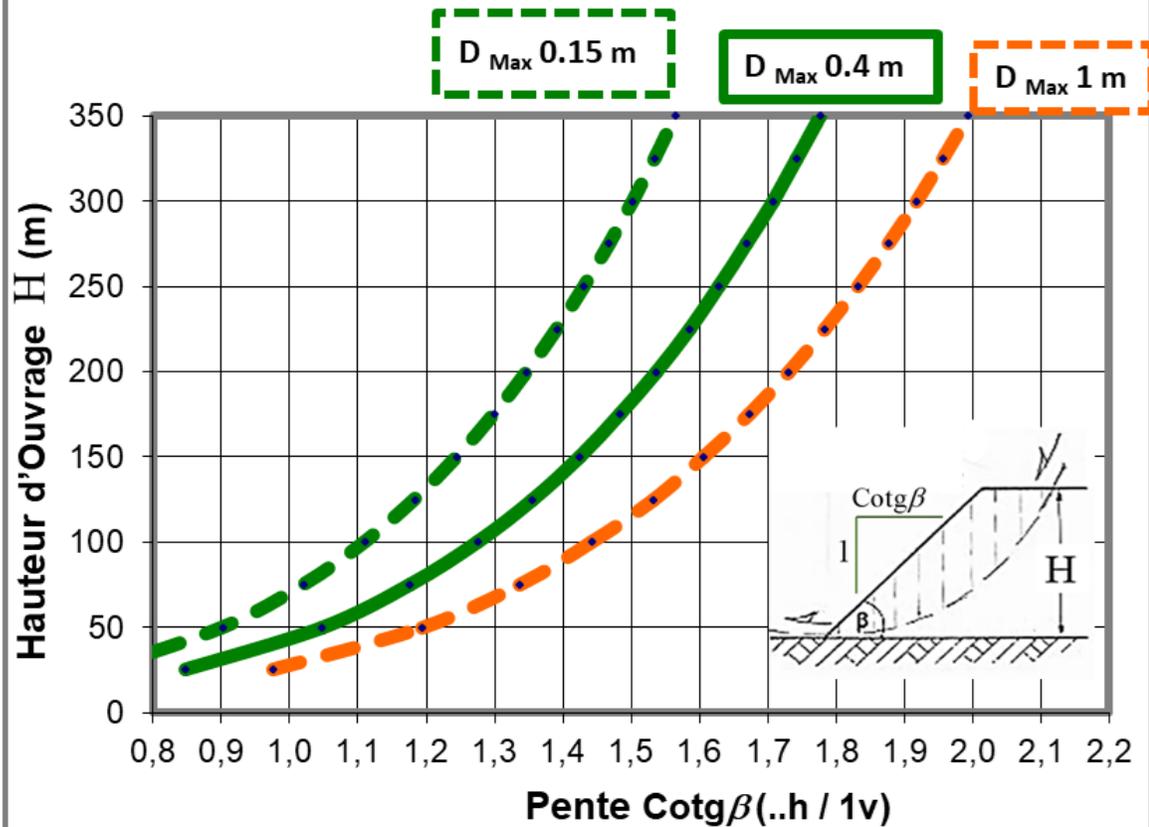
9- Effets d'échelle dus à la rupture des granulats: applications à la conception et la construction

Effets d'échelle explicites sur la stabilité de talus / rupture en cisaillement gravitaire:
(Charles & Soares 1984) + effets d'échelle => incidences combinées de la pente, la hauteur, et la granulométrie

a) Abaque de stabilité de Charles & Soares



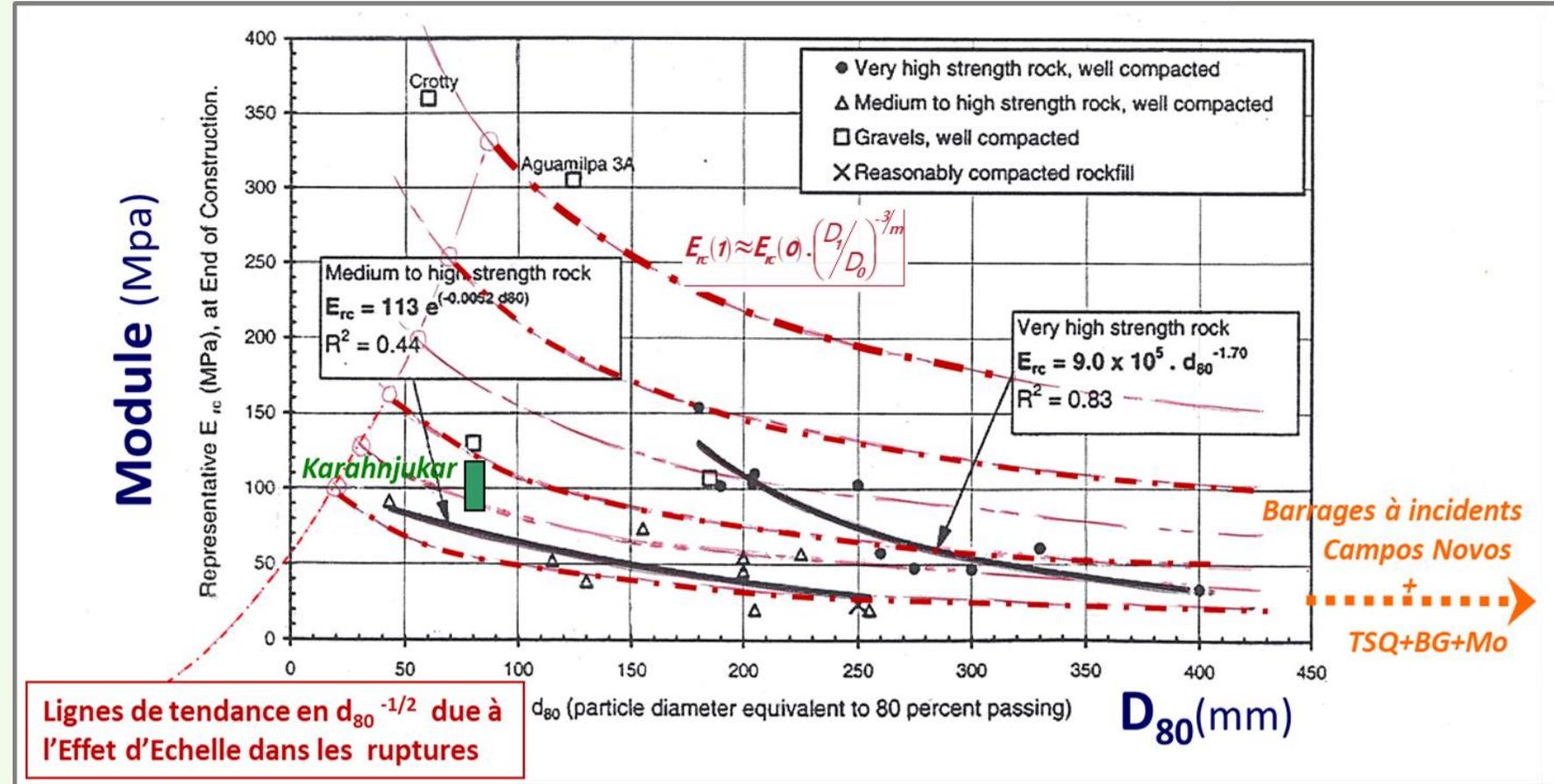
b) Stabilité statique de talus d'enrochements-type compactés
Conditions requises pour maintenir $F_s = 1,50$



9- Effets d'échelle dus à la rupture des granulats: applications à la conception et la construction

- Effets d'échelle sur la déformabilité : « **Modules apparents de rigidité** »

- Statistiques sur 35 grands barrages bien documentés (Hunter & Fell, ASCE 2003)



- Les effets d'échelle dus aux ruptures expliquent l'essentiel de la corrélation,et par ailleurs une grande part des sérieux incidents mentionnés.

Conclusions



Merci pour votre attention...

Construction du Barrage CFRD de Karahnjúkar (Iceland, H=198m) photo Ph. Cazalis/Tractebel Engineering