



Institut de Recherche en
Génie **C**ivil et **M**écanique

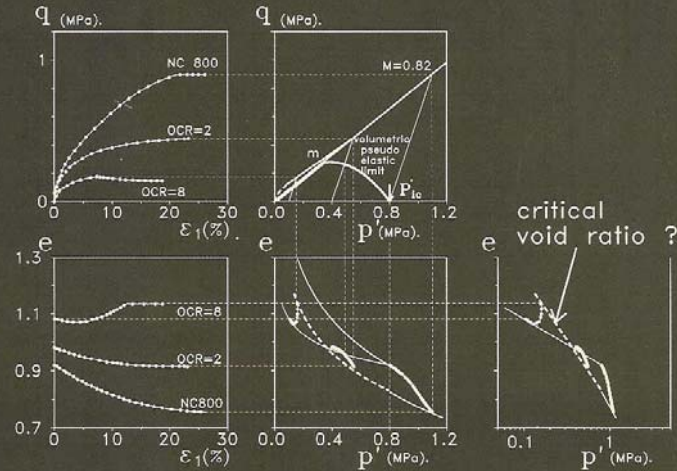
Un modèle de comportement microstructural pour les sols

P.-Y. Hicher* et C. S. Chang**

*Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, CNRS – Ecole Centrale
de Nantes – Université de Nantes, France*

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Massachusetts

Elementary Mechanics of Soil Behaviour



Jean Biarez &
Pierre-Yves Hicher

Saturated
Remoulded
Soils

Sommaire

- Introduction: milieu discret – milieu continu
- Méthode de passage du milieu discret au milieu continu
- Loi de contact
- Quelques simulations numériques du comportement des matériaux granulaires
- Introduction d'une colle intergranulaire
- Conclusion

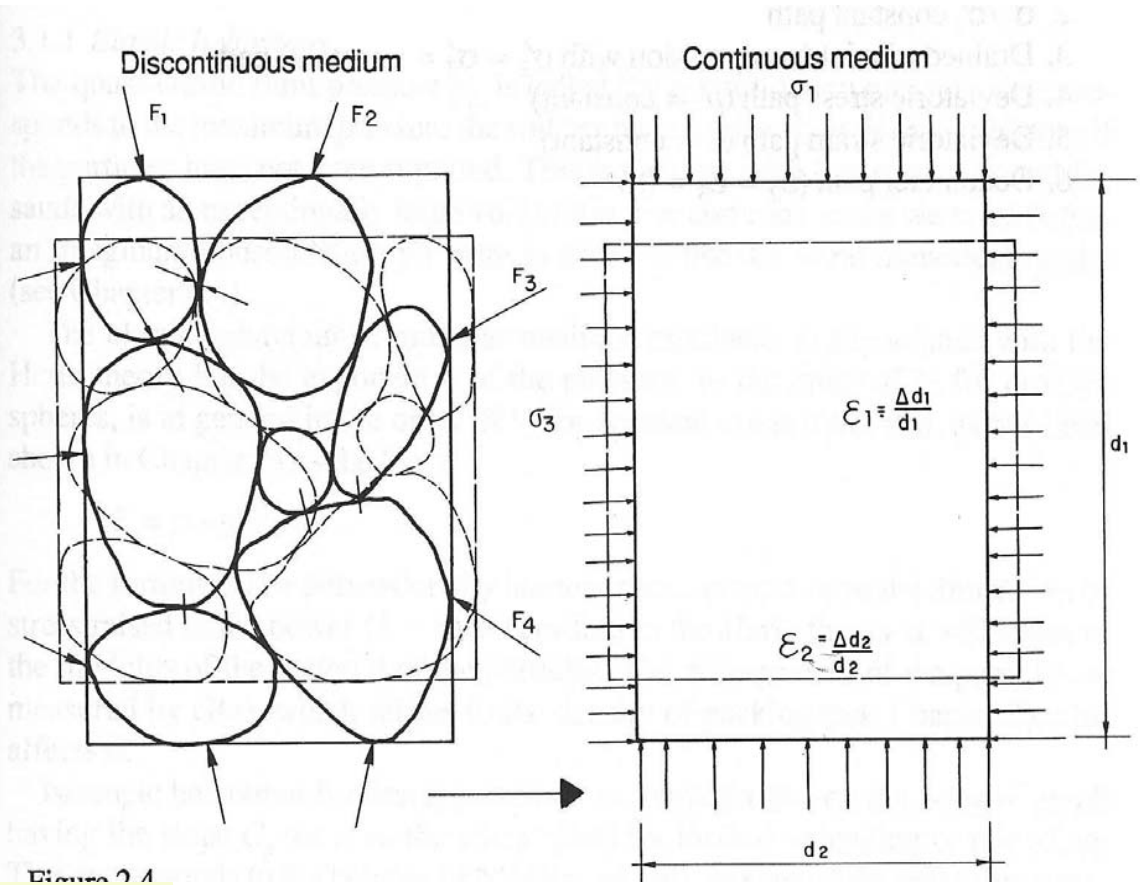
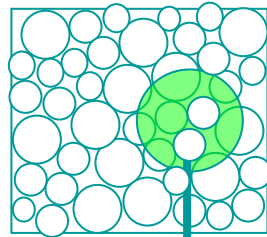


Figure 2.4

Approche multi échelles

Echelle Macro



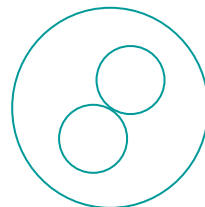
Relation contrainte - déformation

$$\Delta\sigma_{ij} = C_{ijkl} \Delta\varepsilon_{kl}$$



Opération de moyenne

Echelle Micro



Loi de contact inter particules

$$\Delta f_i^\alpha = K_{ij}^\alpha \Delta \delta_j^\alpha$$

Méthode statique

$$\Delta \sigma_{ij} = C_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl}$$

Relation contrainte - déformation

Niveau macro

Contrainte



Déformation

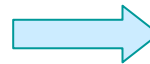
$$\Delta f_j^\alpha = \Delta \sigma_{ij} A_{ik} n_k^\alpha$$



$$\Delta u_{j,i} = A_{ik}^{-1} \sum_{\alpha=1}^N \Delta \delta_j^\alpha l_k^\alpha$$

Niveau micro

Force inter
particule



déplacement
inter particule

Loi de contact

$$\Delta f_i^\alpha = K_{ij}^\alpha \Delta \delta_j^\alpha$$

Tenseur de fabrique

$$A_{ik} = \sum_{\alpha=1}^N l_i^\alpha l_k^\alpha$$

Loi de contact élastoplastique

Pour chaque contact inter particulaire: f_n, f_s, f_t $\delta_n, \delta_s, \delta_t$

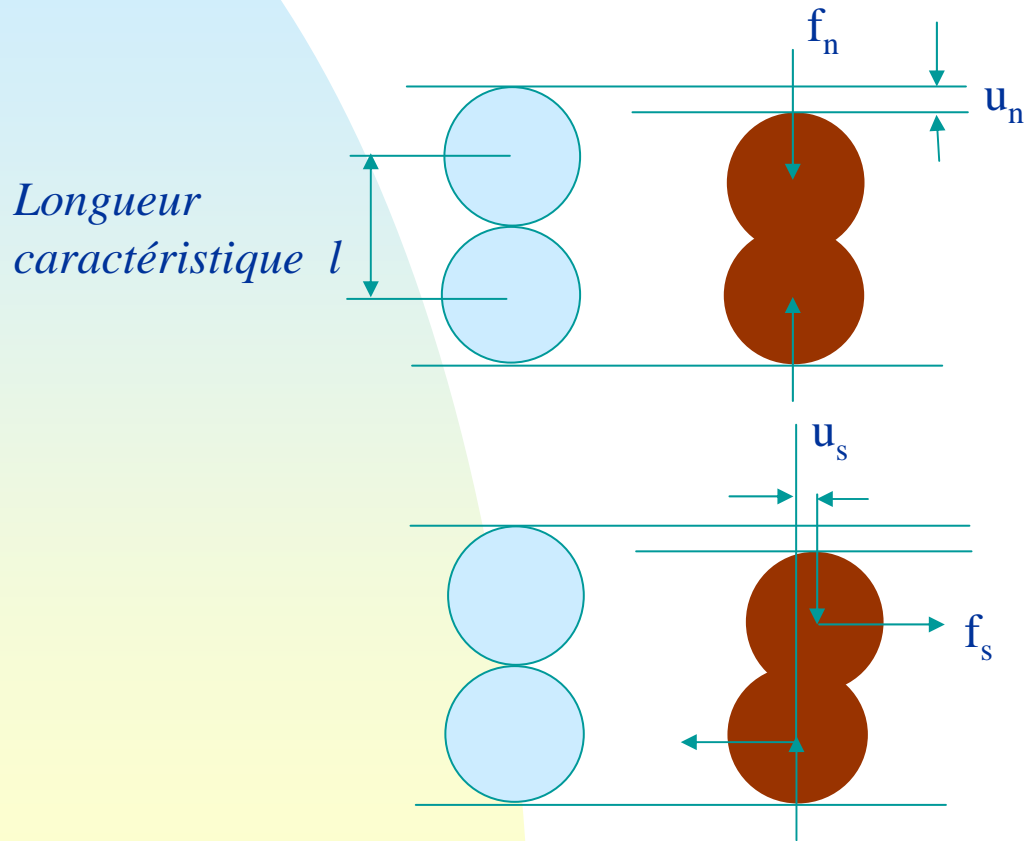
$$f_r = \sqrt{f_s^2 + f_t^2}$$

$$\delta_r = \sqrt{\delta_s^2 + \delta_t^2}$$

- Une partie élastique
- Une partie plastique

Partie élastique de la loi de contact

Relation de type Hertz - Mindlin



$$k_n^\alpha = k_{n0}^\alpha \left(\frac{f_n^\alpha}{G_g l^2} \right)^n$$

$$k_{n0}^\alpha = G_g l^\alpha \left(\frac{\sqrt{3/2}}{1-\nu_g} \right)^{2/3}$$

$$k_s^\alpha = k_{s0}^\alpha \left(\frac{f_s^\alpha}{G_g l^2} \right)^n$$

$$k_{s0}^\alpha = k_{n0}^\alpha \frac{2(1-\nu_g)}{2-\nu_g}$$

Paramètres élastiques

- Propriétés du contact

- Rigidité normale k_{n0}
- Rigidité tangentielle k_{s0}
- Exposant de non linéarité n

- Géométrie de l'assemblage

- Densité de contacts $\rho = \frac{N}{V} l^3$

- Anisotropie des contacts $A_{ik} = \sum_{\alpha=1}^N l_i^\alpha l_k^\alpha$

Partie plastique de la loi de contact

- Surface de charge (Mohr-Coulomb)

$$F = f_r - f_n \mathcal{K}(\delta_r^p) = 0$$

- Loi d'écroûissage

$$\mathcal{K} = \frac{k^p \tan \phi_p \delta_r^p}{f_n \tan \phi_p + k^p \delta_r^p}$$

- Potentiel plastique

En cisaillement: $G = f_r - f_n \mathcal{K}(\delta_r^p) = 0$

Equation de dilatance: $\frac{d\delta_n^p}{d\delta_r^p} = \frac{f_r}{f_n} - \tan \phi_0$

Effet de l'enchevêtrement des grains

- Angle de frottement

$$\tan \phi_p = \left(\frac{e_c}{e} \right)^m \tan \phi_\mu$$

- Indice des vides critiques

$$e_c = e_{ref} - \lambda \log \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right)$$

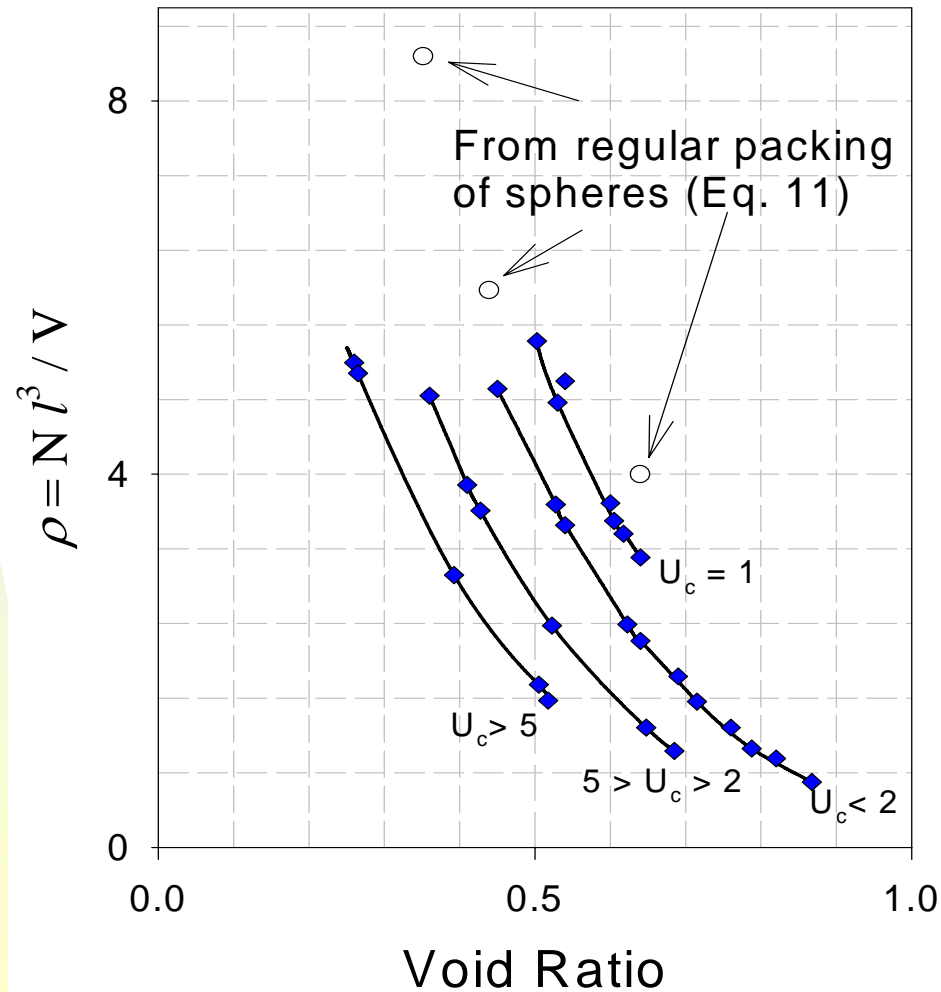
Paramètres (plastiques)

- angle de frottement ϕ_μ
- exposant m
- Indice des vides de référence e_{ref}
- compressibilité λ
- Rigidité plastique k^p

(élastiques)

- rigidité normale k_{n0}
- rigidité tangentielle k_{s0}
- exposant n
- Densité de l'assemblage $\rho = \frac{N}{V} l^3$

Relations empiriques entre la densité de contact et l'indice des vides



Sable d'Hostun

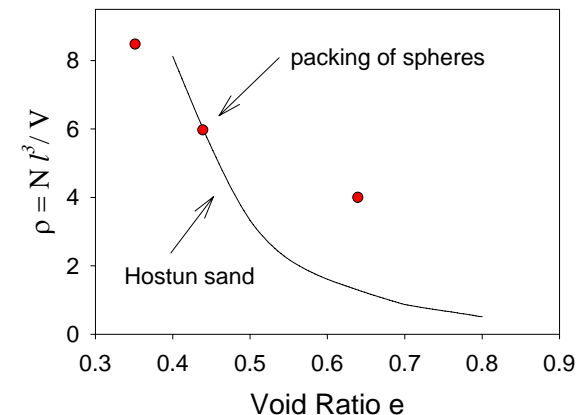
Paramètres élastiques

- Rigidité normale $k_{n0} = 62 \text{ kN} / \text{mm}$
- Rigidité tangentielle $k_{s0} = 31 \text{ kN} / \text{mm}$
- exposant $n = 0.5$

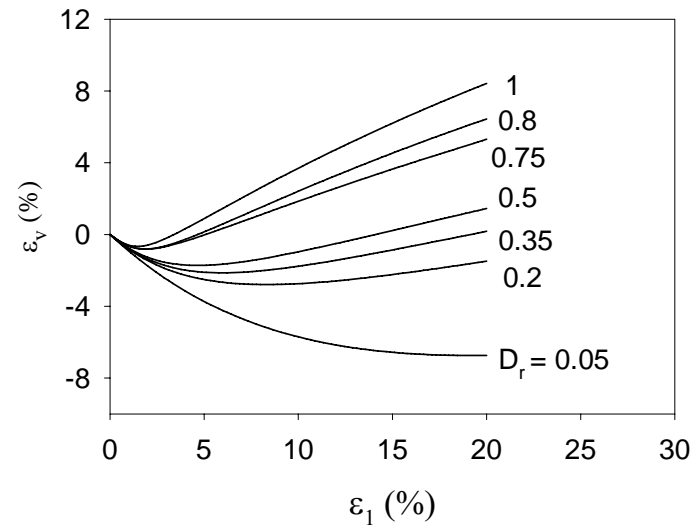
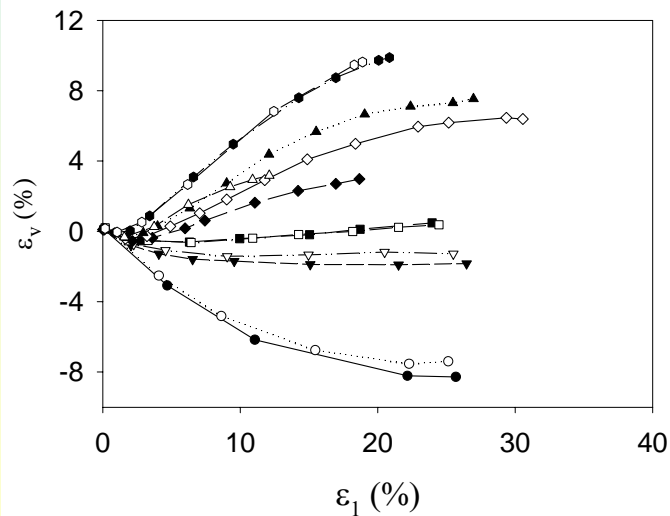
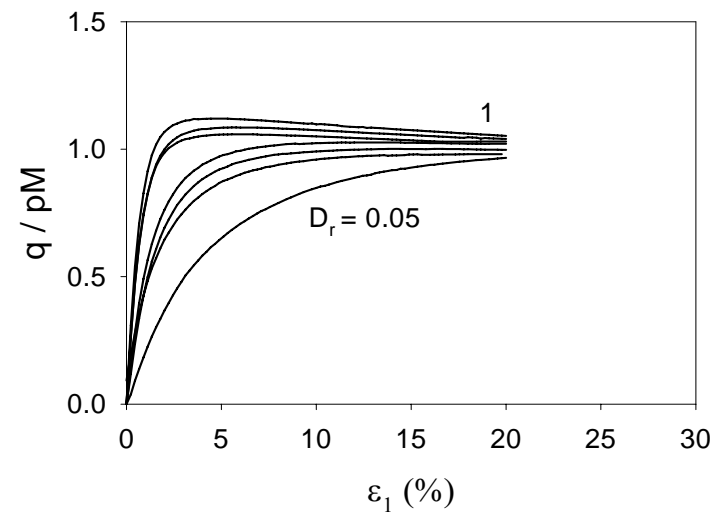
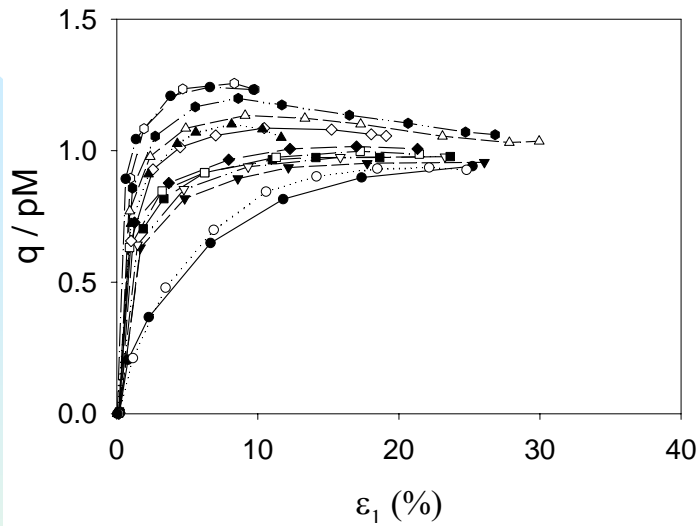
Paramètres plastiques

- Angle de frottement $\phi_{\mu} = 33^{\circ}$
- exposant $m = 0.6$
- Indice des vides de référence $e_{ref} = 0.81$
- compressibilité $\lambda = 0.16$
- Rigidité plastique $k^p = 62 \text{ kN} / \text{mm}$

- Densité de l'assemblage $\rho = \frac{N}{V} l^3$

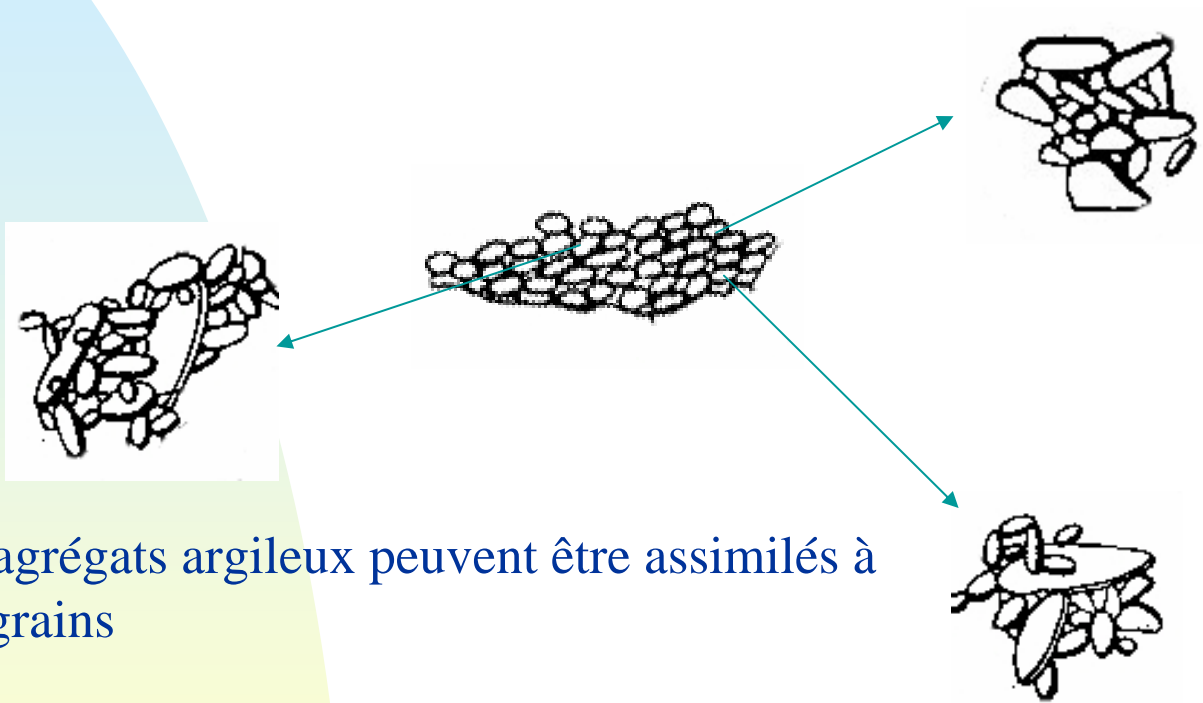


Comparaison entre résultats expérimentaux et numériques



Essais de compression axisymétrique

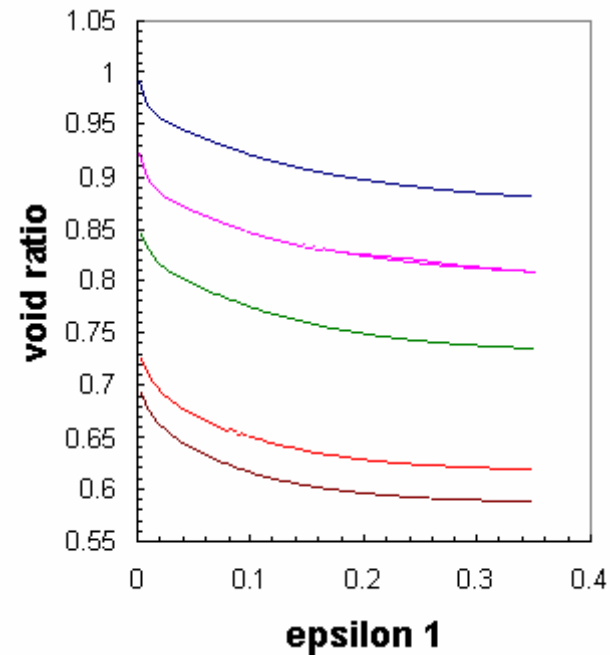
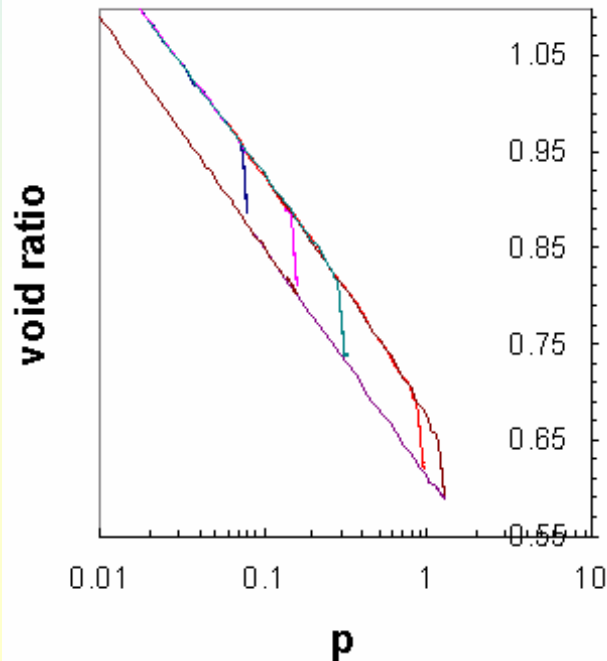
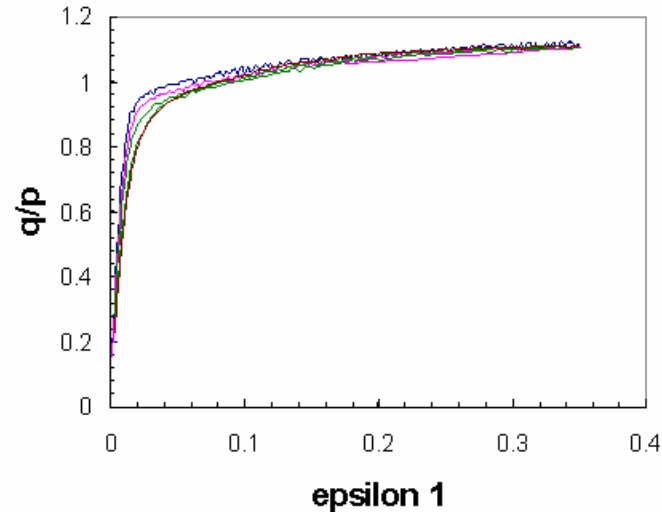
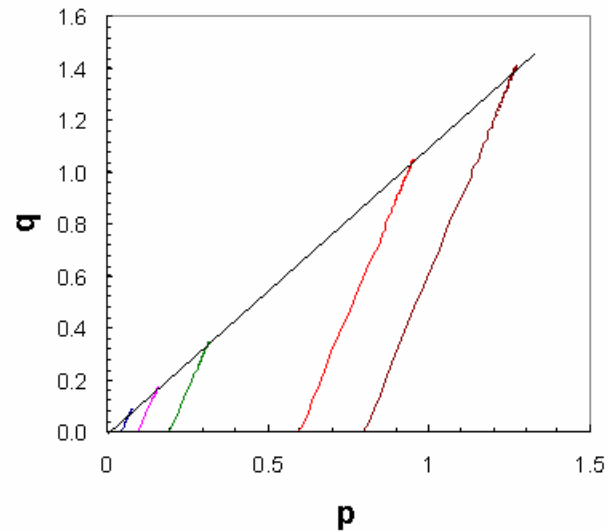
Microstructure des matériaux argileux



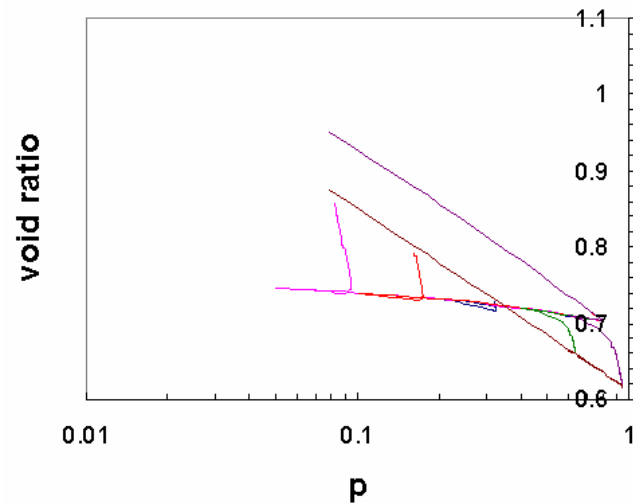
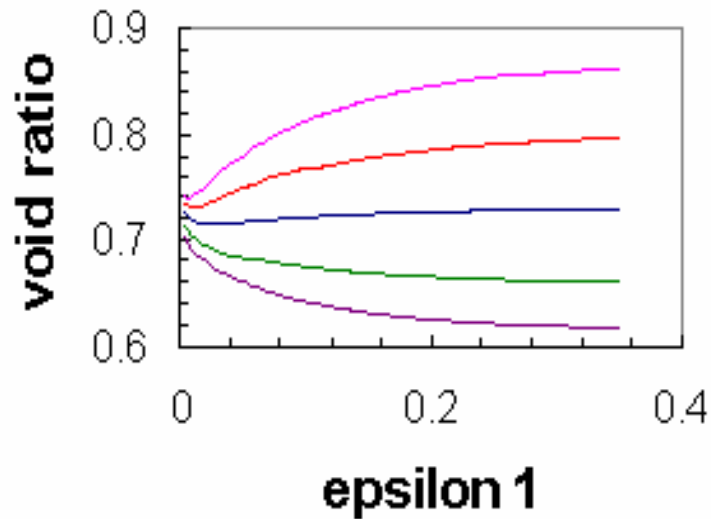
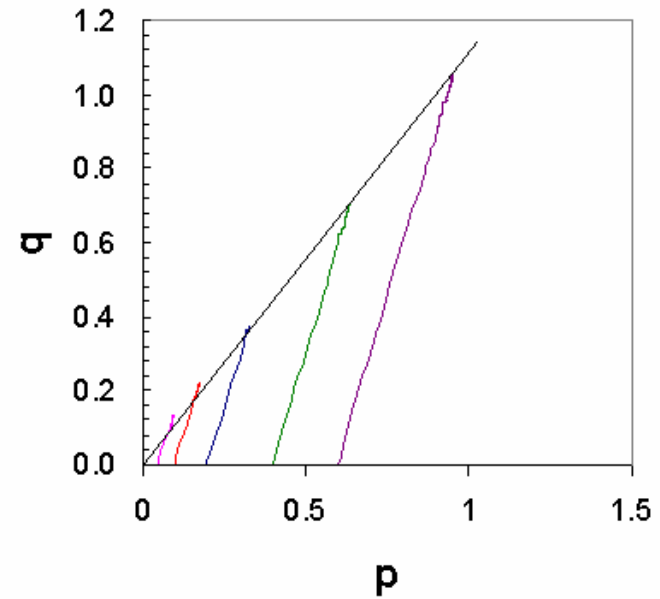
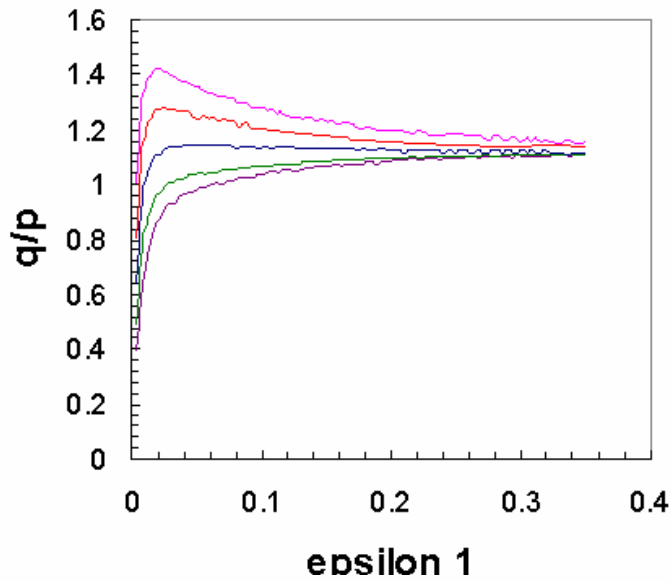
Les agrégats argileux peuvent être assimilés à des grains

Les argiles peuvent être considérées comme des assemblages d'agrégats déformables soumis à des forces de contact d'origine mécanique

Essais triaxiaux drainés sur une argile NC



Essais triaxiaux drainés sur une argile SC



Chapitre 2

Mécanismes de déformation des sols

J. Biarez & P.Y. Hicher

Mécanique et Ingénierie des Matériaux

Elastoplasticité des sols et des roches

Modèles de comportement des sols et des roches 1



sous la direction de
Pierre-Yves Hicher
Jian-Fu Shao

hermes

Lavoisier

Effet d'une colle entre les grains

Matériaux granulaires: sables injectés, bétons bitumineux

Argiles naturelles normalement consolidées ou surconsolidées

Influence du comportement de la colle: ductile
ou fragile, avec ou sans endommagement

Son insertion dans le modèle peut être réalisé à l'aide
d'une force d'adhésion appliquée à chaque contact
intergranulaire

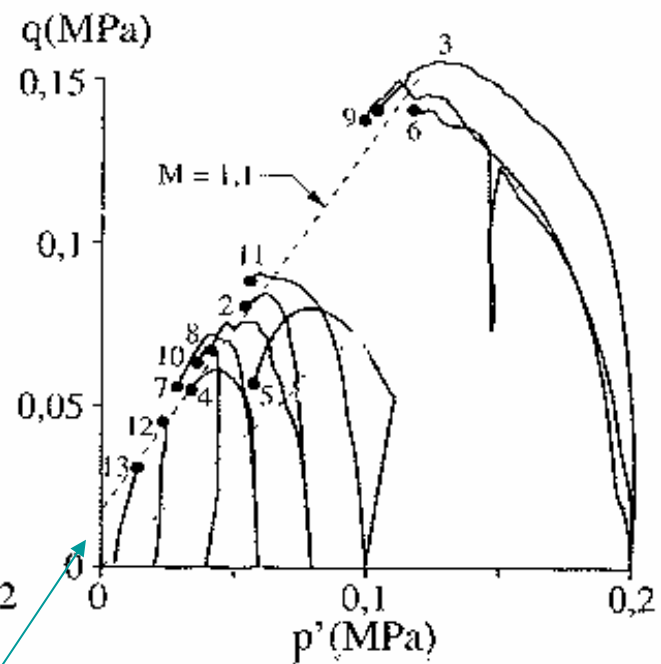
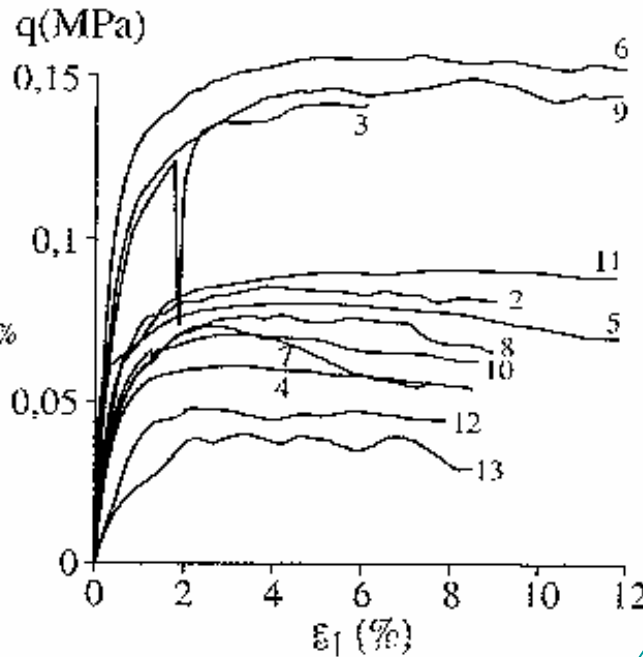
Deux exemples de colle intergranulaire

- Argile naturelle PDG : exemple de colle ductile
- Sable de Fontainebleau injecté par un coulis de ciment fin: exemple de colle fragile avec endommagement

Argile naturelle PDG : l'argile de Guiche

Argile de Guiche
 $W_L = 50\%$; $I_p = 25\%$
LCPC non remanié
 $z = 13,5 - 13,6$ m

- 2 : $\sigma_3 = 0,08$ (MPa)
- 3 : $\sigma_3 = 0,2$ (MPa)
- 4 : $\sigma_3 = 0,06$ (MPa)
- 5 : $\sigma_3 = 0,1$ (MPa)
- 6 : $\sigma_3 = 0,2$ (MPa)
- 7 : $\sigma_3 = 0,04$ (MPa)
- 8 : $\sigma_3 = 0,08$ (MPa)
- 9 : $\sigma_3 = 0,2$ (MPa)
- 10 : $\sigma_3 = 0,06$ (MPa)
- 11 : $\sigma_3 = 0,1$ (MPa)
- 12 : $\sigma_3 = 0,02$ (MPa)
- 13 : $\sigma_3 = 0,005$ (MPa)



cohésion

Essais triaxiaux non drainés

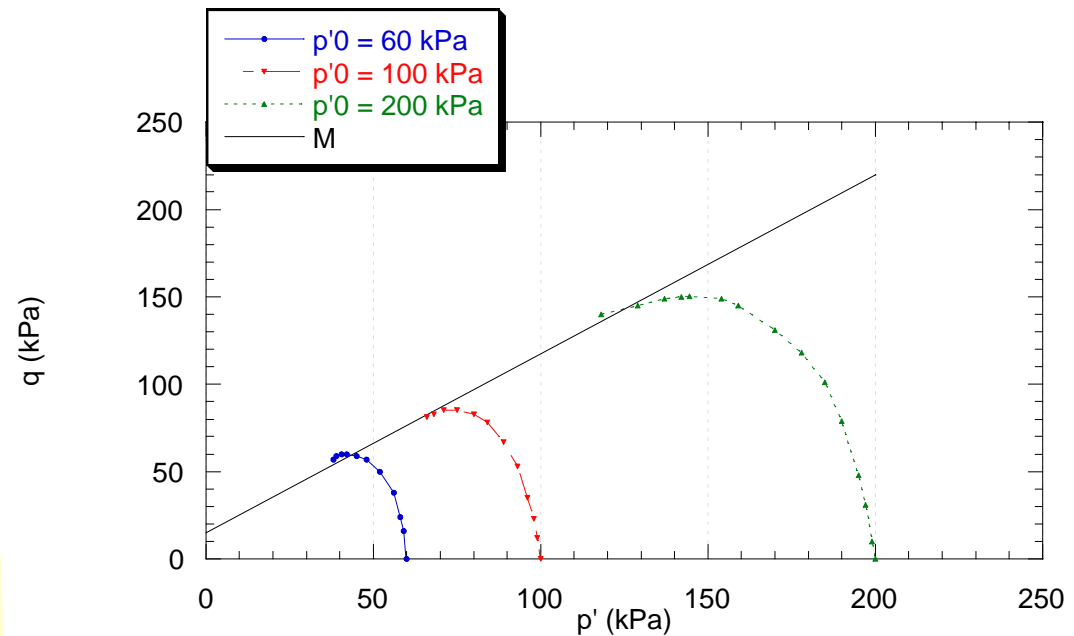
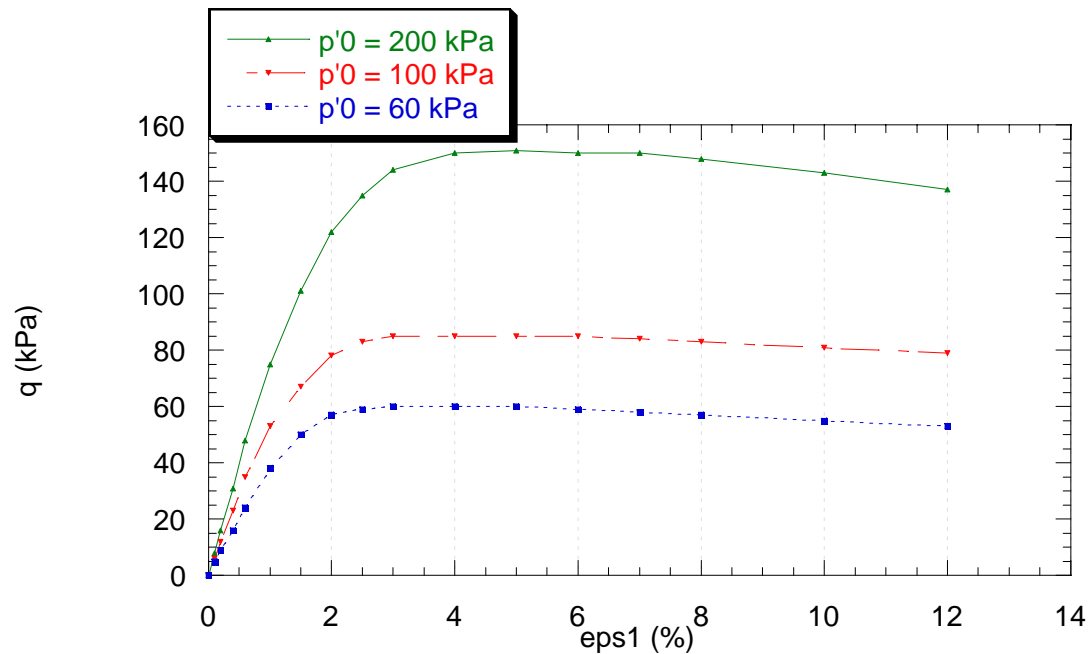
Argile naturelle PDG : l'argile de Guiche

Légère cohésion intergranulaire maintenue pour des déformations de plusieurs pourcents :

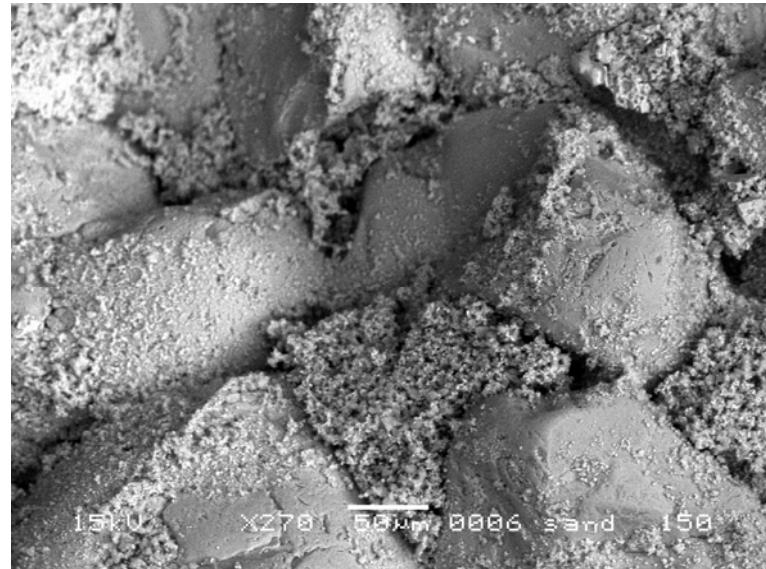
prise en compte par une colle ductile représentée par une force d'attraction agissant sur chacun des contacts et maintenue constante au cours du chargement

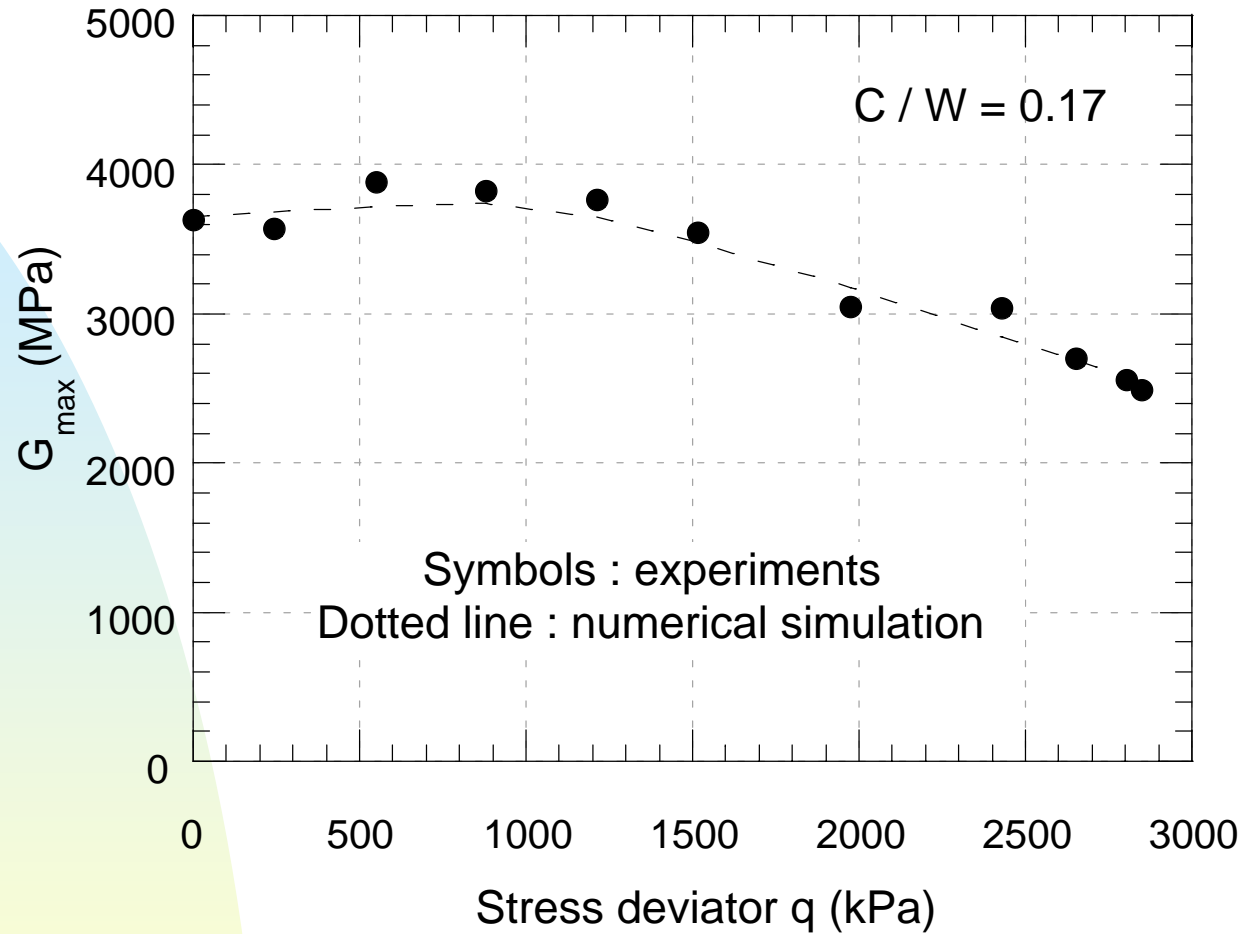
La force est calibrée de façon à obtenir par intégration sur l'ensemble des contacts une cohésion apparente de même valeur que celle mesurée

Modélisation d'essais triaxiaux non drainés sur l'argile de Guiche



Exemple d'une colle fragile: le sable de Fontainebleau injecté par un coulis de ciment fin





Evolution du module élastique lors d'un chargement triaxial

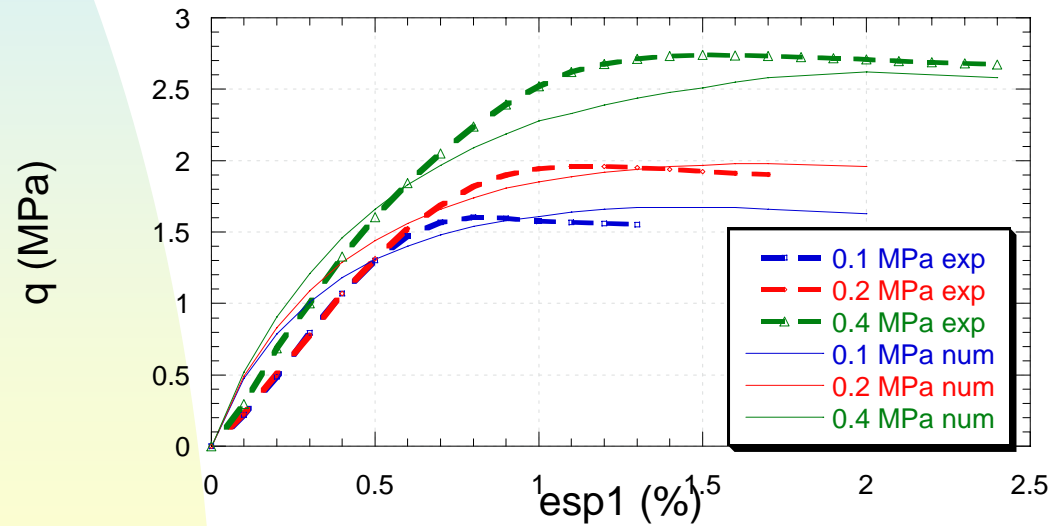
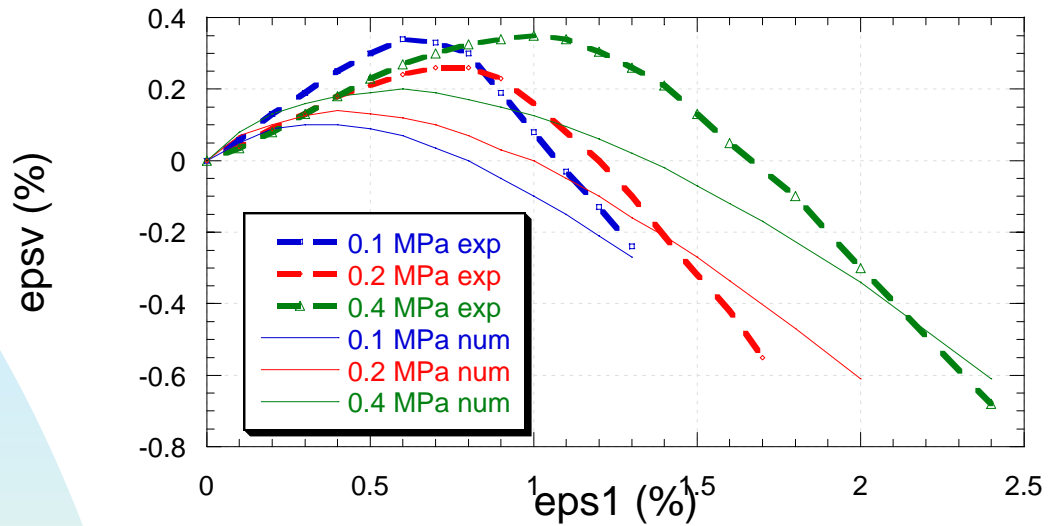
Endommagement local de l'adhésion entre grains

$$f_{ad} = f_{ad}^0 e^{-\eta_b (\rho - \delta_b)} \quad \text{avec } \rho > \delta_b$$

f_{ad}^0 est la force d'adhésion initiale, η_b est le facteur de dommage.
 ρ est un déplacement local équivalent:

$$\rho = [(\beta \delta_n^t)^2 + \Delta^2]^{1/2}$$

avec δ_n^t correspondant au déplacement normal en élongation.



Sable de Fontainebleau injecté par Intra-J $C/W = 0.175$

Conclusion

Une approche d'homogénéisation adaptée aux matériaux granulaires permet d'estimer correctement le comportement de ce type de matériaux à partir de la donnée d'une loi de contact appropriée.

Le modèle présente l'avantage de pouvoir prendre en compte de façon assez naturelle différents mécanismes au niveau du contact entre grains

Le modèle prend également en compte de façon directe l'anisotropie induite par le chargement et permet de prendre en compte l'existence éventuelle d'une anisotropie structurelle