

Soutenance de thèse de Jérôme DURIEZ
(Directeurs : F. Darve et F.-V. Donzé)



Stabilité des massifs rocheux : Une approche mécanique

Vendredi 20 Novembre 2009



Problématique



Chaos du Croé, Aussois (Savoie)

Problématique



Chaos du Croé, Aussois (Savoie)



*Éboulement à l'Eiger (Suisse)
juillet 2006*

Problématique



*Éboulement sur la "route du littoral"
Île de la Réunion, mars 2006*

Problématique



*Éboulement sur la "route du littoral"
Île de la Réunion, mars 2006*



*Éboulement sur la RD531,
Gorges de la Bourne (Vercors), janvier 2009*

Problématique



*Éboulement sur la "route du littoral"
Île de la Réunion, mars 2006*



*Éboulement sur la RD531,
Gorges de la Bourne (Vercors), janvier 2009*

Protection contre les chutes des blocs

Problématique

Protection contre les chutes des blocs



Prédiction de "l'aléa" :

Sous quelles conditions un éboulement va se produire ? Quel sera le volume concerné ?

*Filets de protection sur la "route du littoral"
Île de la Réunion*

Problématique

Protection contre les chutes des blocs



*Filets de protection sur la "route du littoral"
Île de la Réunion*

Prédiction de "l'aléa" :

Sous quelles conditions un éboulement va se produire ? Quel sera le volume concerné ?

Hyp : falaises à matrice saine, mais présentant des discontinuités => éboulement causé par la rupture des discontinuités de la falaise (= joints rocheux ici)

Différentes sortes de discontinuités :

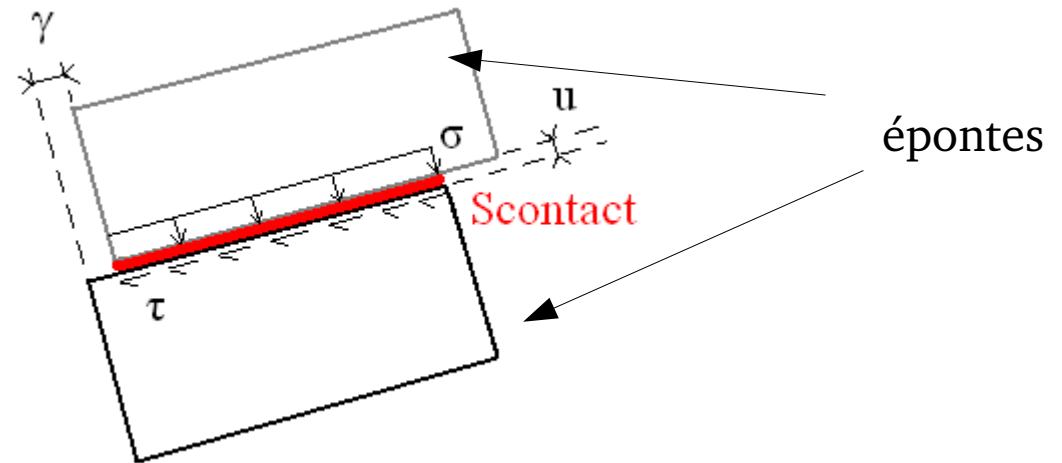
- **discontinuités présentant un matériau de remplissage** (issu de l'érosion des épontes...)

Problématique

Le comportement de ces joints rocheux

- une loi de comportement :

$$\vec{d}\sigma = \begin{pmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{pmatrix} = f(\vec{dl}) = f \begin{pmatrix} d\gamma \\ du \end{pmatrix}$$



- un critère de rupture :

Sous quelles conditions la rupture du joint, entraînant l'éboulement, va-t-elle se produire ?

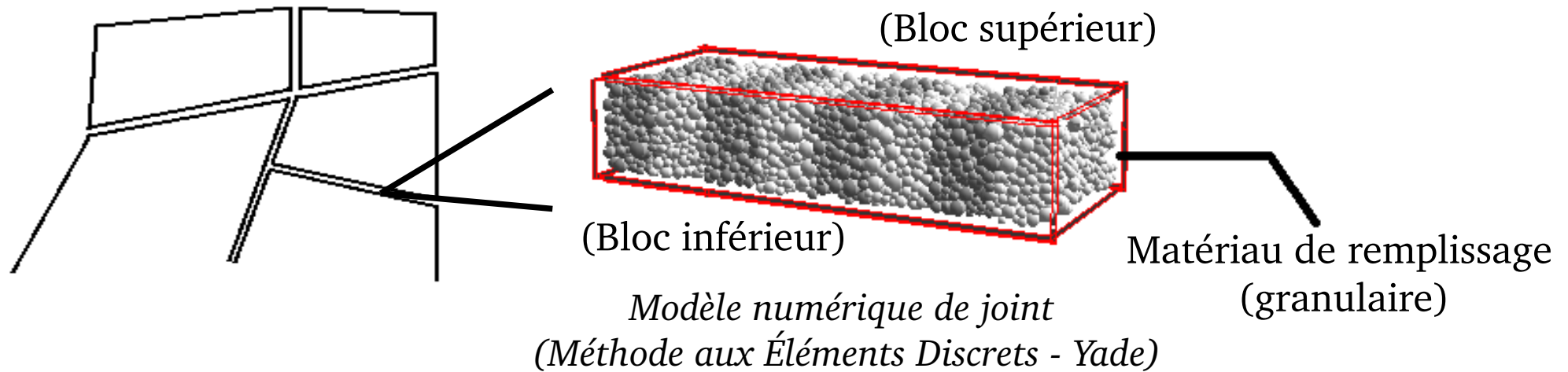
Plan

- I. Un modèle numérique de joint rocheux
- II. Une nouvelle loi de comportement de joint rocheux
- III. Un critère de rupture : le critère du "travail du second ordre". Application à la loi de comportement
- IV. Application à l'étude des "Gorges de Valabres"

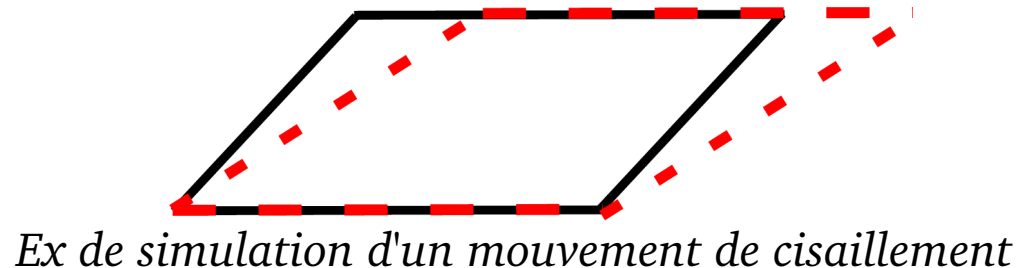
Le modèle numérique de joint

Modélisation du joint rocheux lui-même :

=> le matériau de remplissage (érosion des épontes suite à des déplacements antérieurs...)



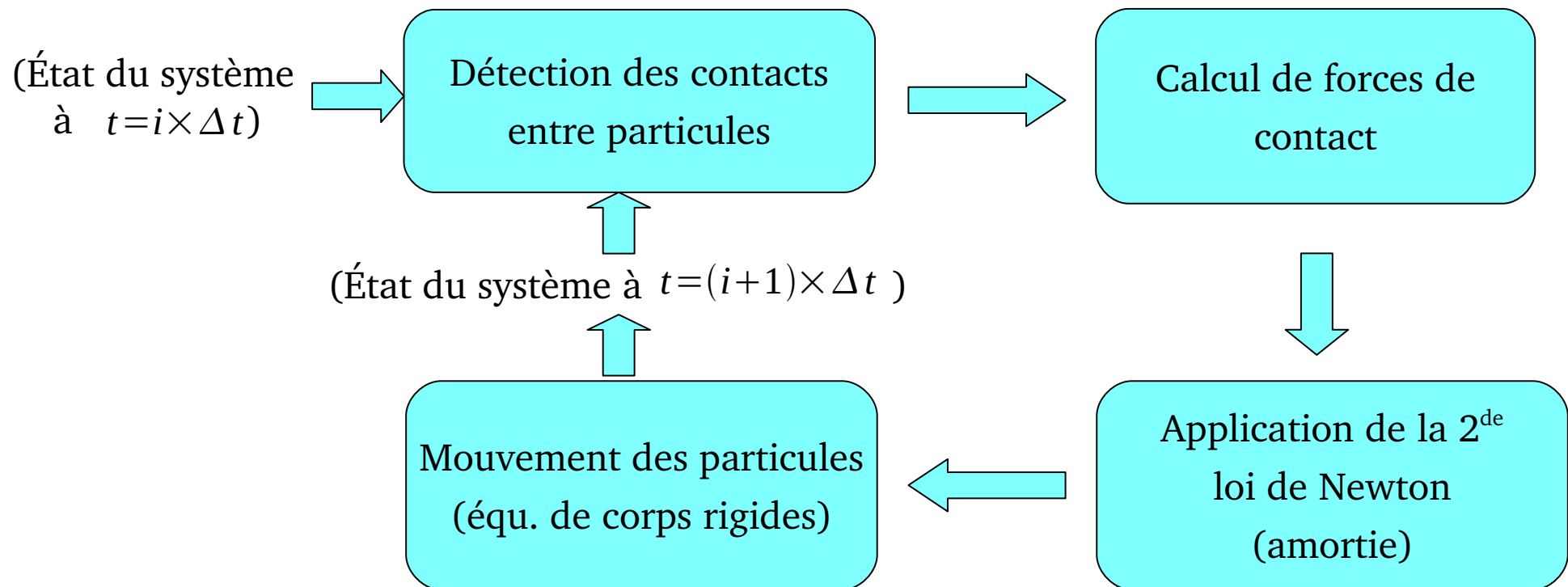
Déformations de la boîte <=> Mouvements relatifs des épontes



Le modèle numérique de joint

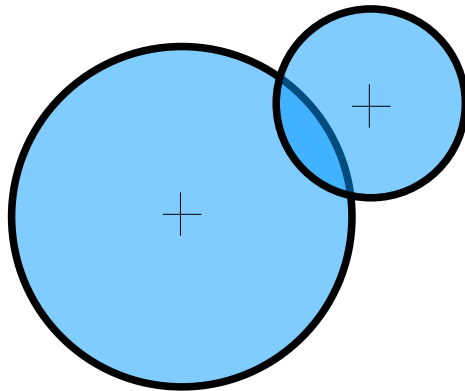
La Méthode aux Éléments Discrets (MED) :

- discrétisation spatiale : système considéré = collection de particules
- discrétisation temporelle : description du système physique tous les Δt secondes (Δt = pas de temps)
- évolution du système numérique au cours d'un pas de temps :



Le modèle numérique de joint

Les lois de contact du modèle :

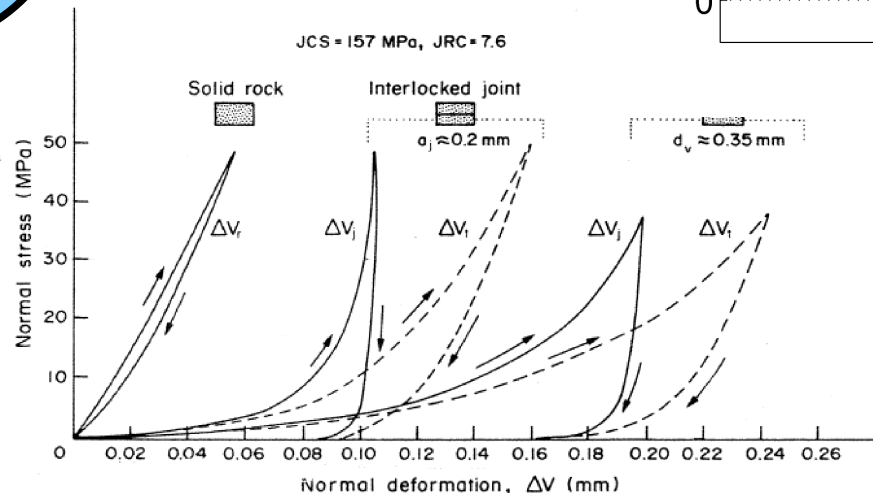
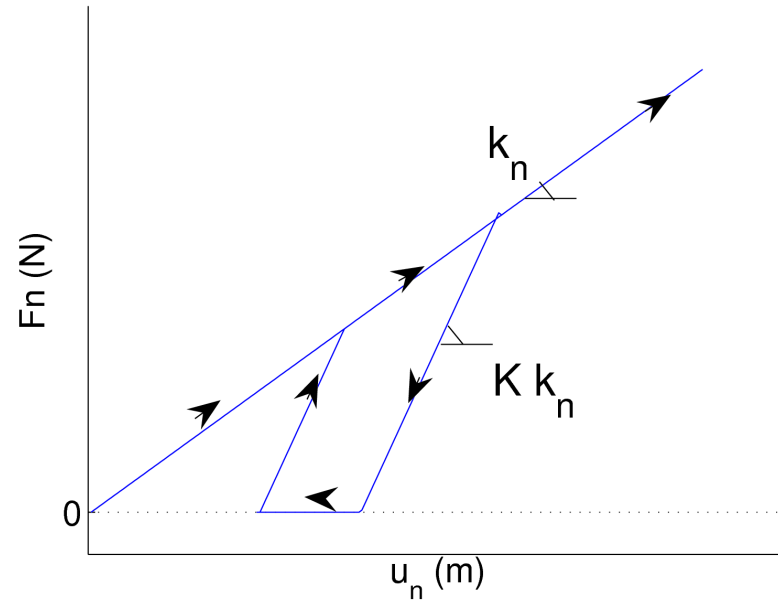
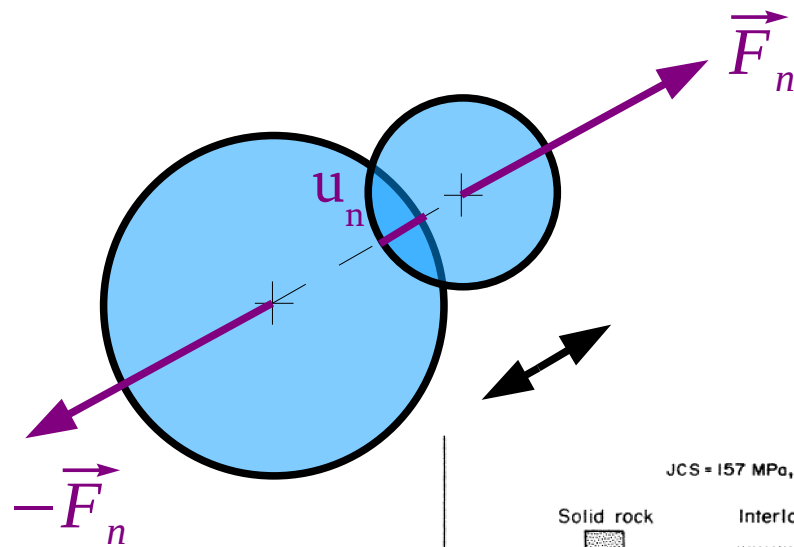


Relier les efforts aux mouvements relatifs des sphères

Le modèle numérique de joint

Les lois de contact du modèle :

Direction normale au contact



$$k_n = f(Y_i, R_i)$$

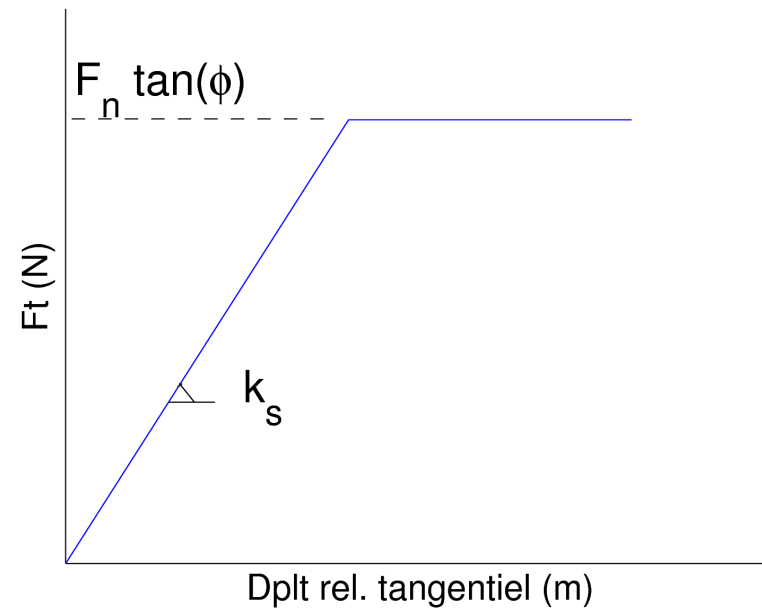
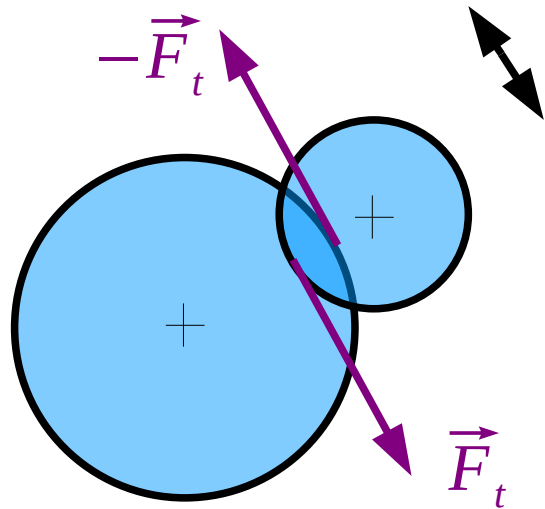
Y : paramètres du modèle,
R : rayons

Courbes $\sigma(u)$ expérimentales de joint rocheux (Bandis et al. 1983)

Le modèle numérique de joint

Les lois de contact du modèle :

Direction tangentielle au contact

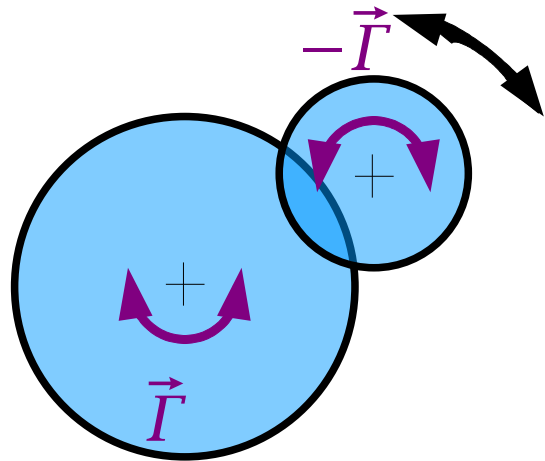


$$k_s = g(Y_i, P_i, R_i)$$

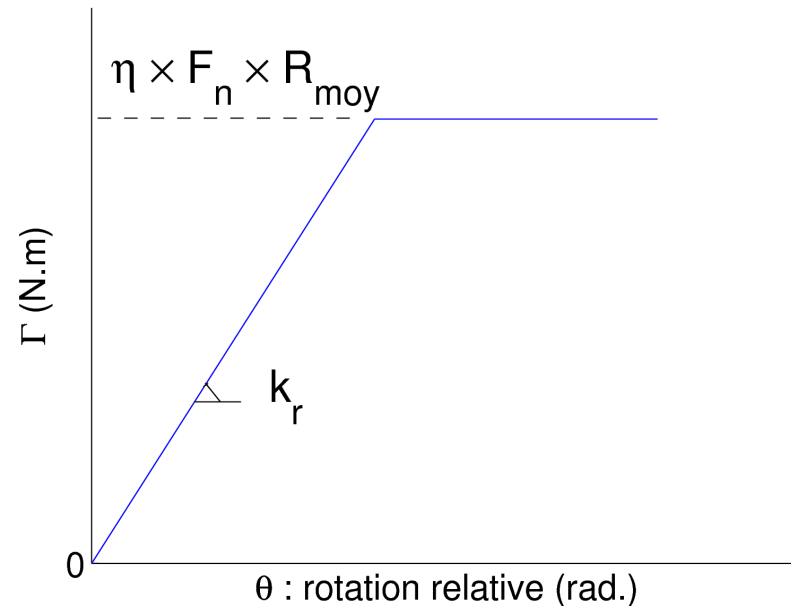
Y, P, ϕ : paramètres du modèle,
 R : rayons

Le modèle numérique de joint

Les lois de contact du modèle :



Introduction d'un moment



$$k_r = h(\beta, R_i)$$

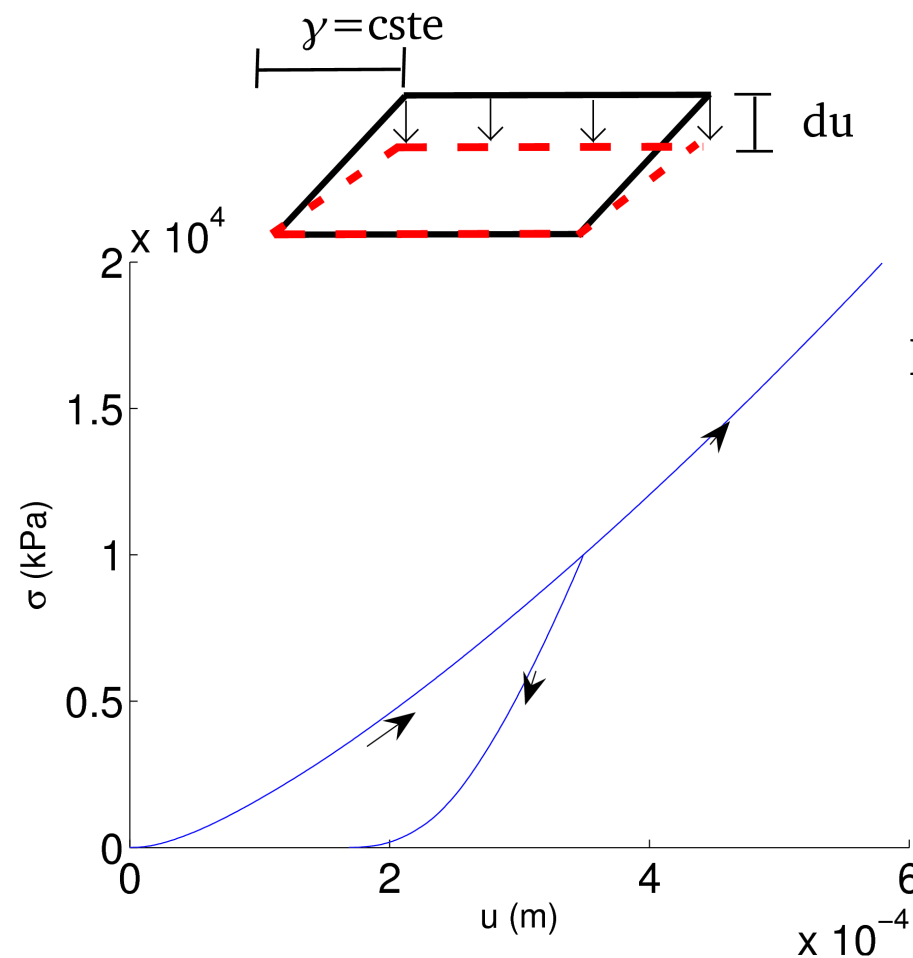
β, η : paramètres du modèle,
 R : rayons

But : compenser les inconvénients d'une modélisation de géomatériaux granulaires avec des billes (roulement excessif des billes => sous-estimation de la résistance au cisaillement)

Le modèle numérique de joint

Simulations d'essais mécaniques de joints rocheux :

- essai de compression à déplacement tangentiel constant (DTC) : compression œdométrique



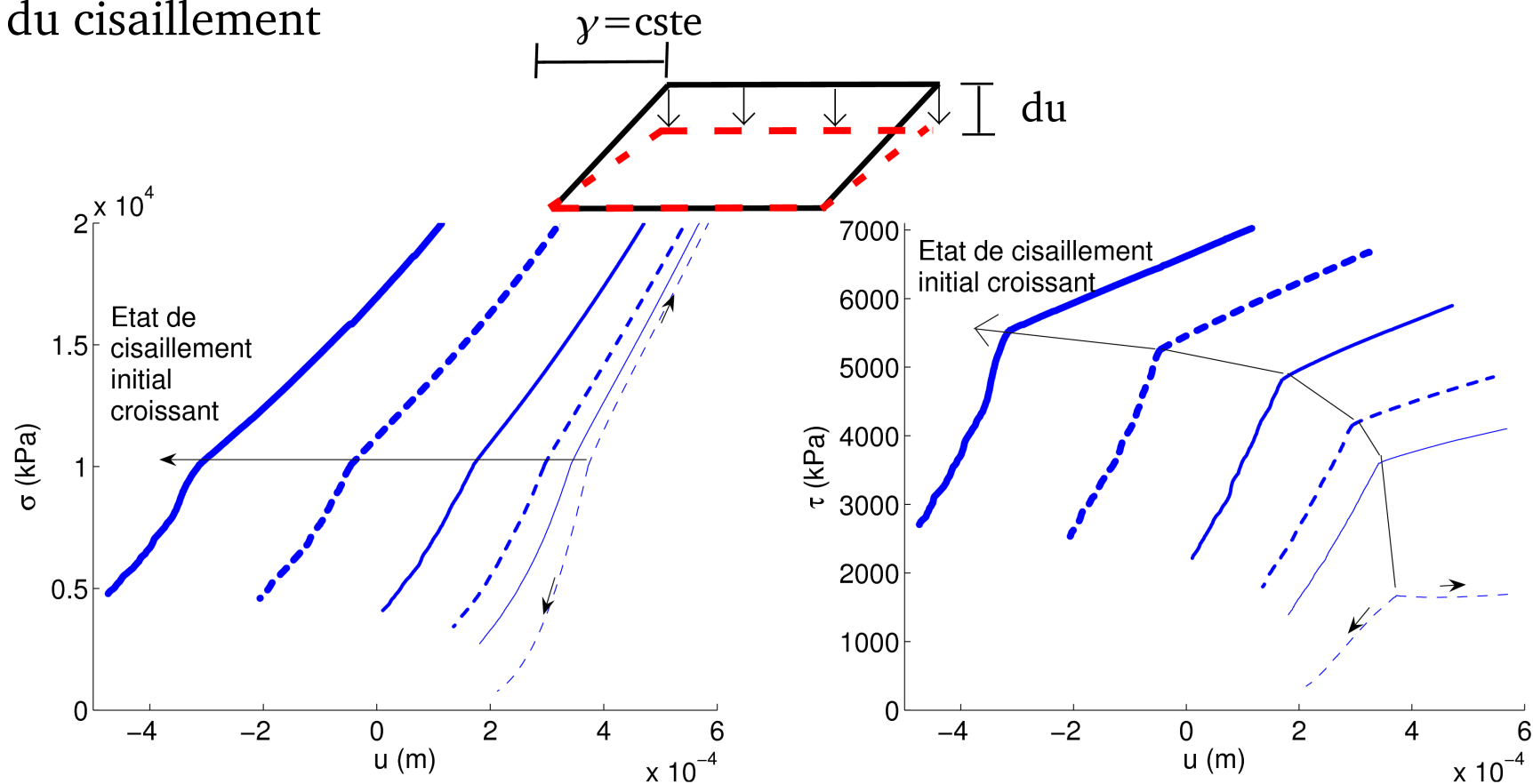
Depuis un état non cisailé
(pas de variations de τ)

Résultats numériques

Le modèle numérique de joint

Simulations d'essais mécaniques de joints rocheux :

- essai de compression à déplacement tangential constant (DTC) : avec influence du cisaillement



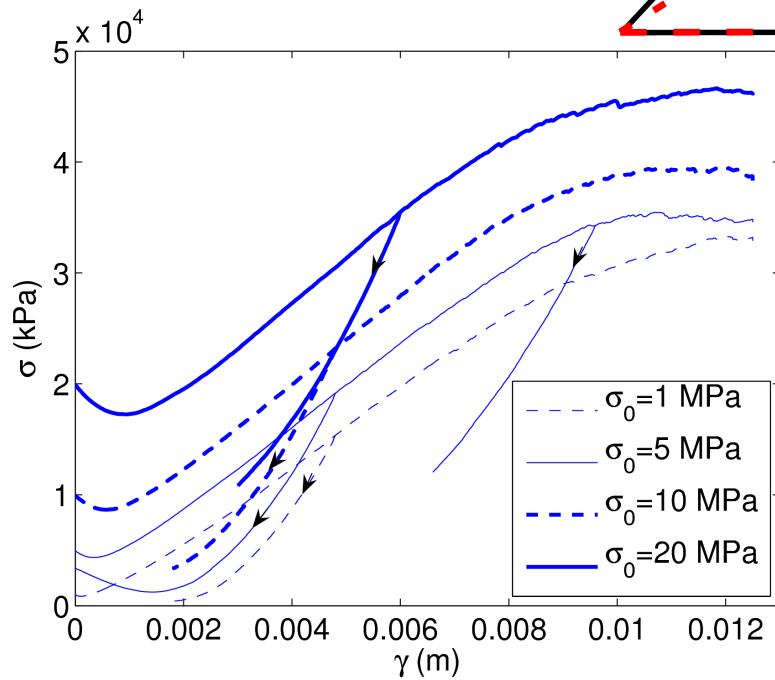
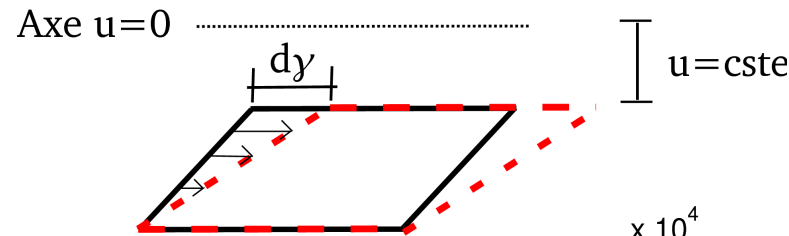
Résultats numériques

- décroissance de la rigidité normale
- augmentation de l'influence de u sur τ

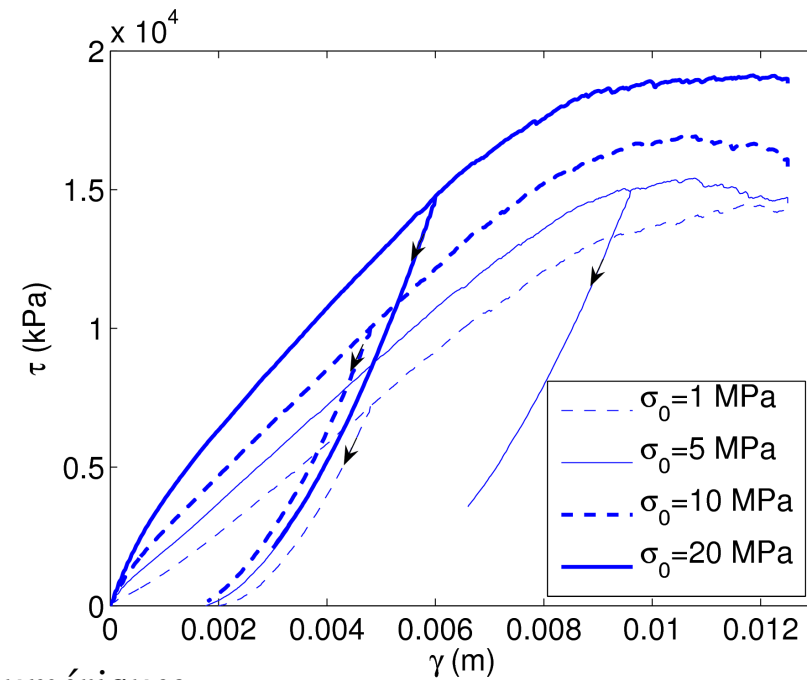
Le modèle numérique de joint

Simulations d'essais mécaniques de joints rocheux :

- essai de cisaillement à déplacement normal constant (DNC)



- contractant puis dilatant



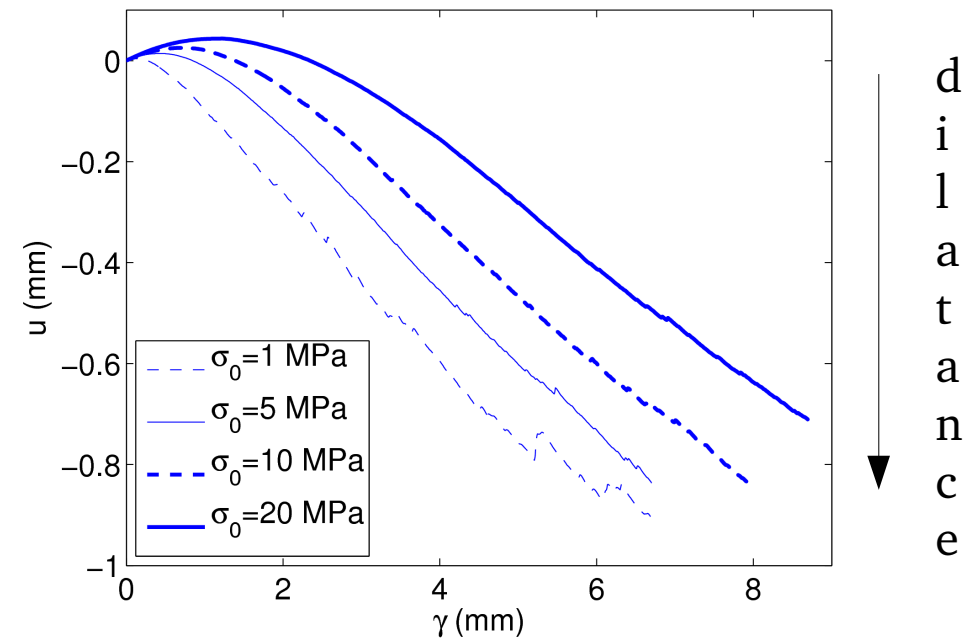
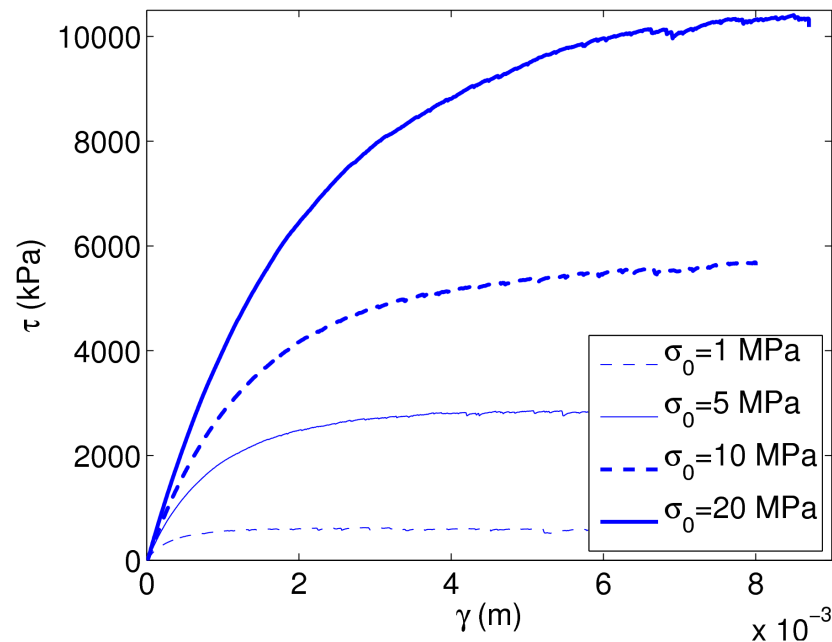
- écouissage progressif

Résultats numériques

Le modèle numérique de joint

Simulations d'essais mécaniques de joints rocheux :

- essai de cisaillement à contrainte normale constante (CNC), influence de σ



Résultats numériques

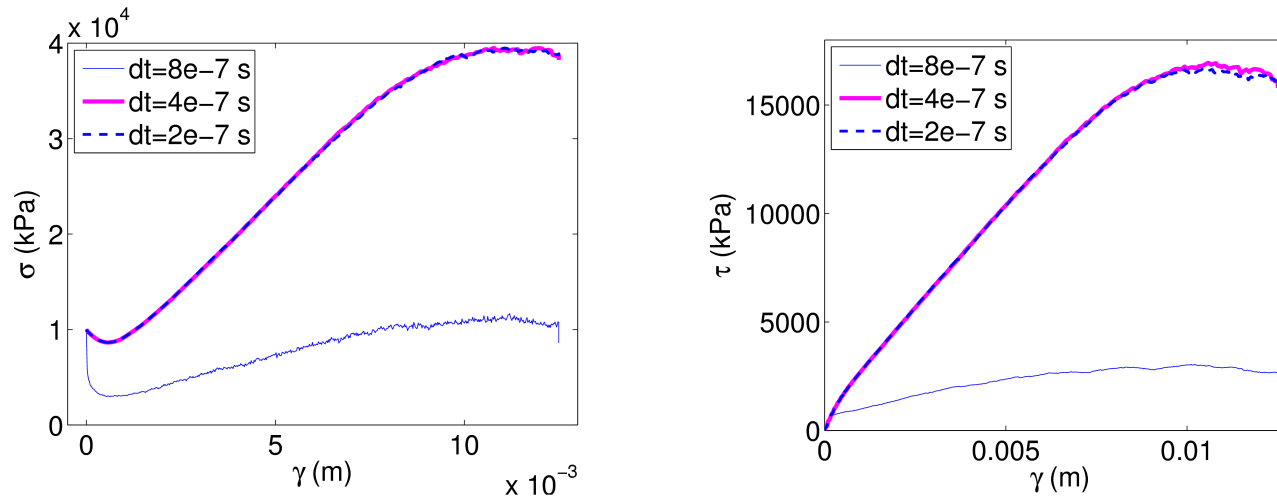
σ augmente =>

- augmentation de la valeur maximale de τ , et de la raideur tangentielle
- diminution de la dilatance

Le modèle numérique de joint

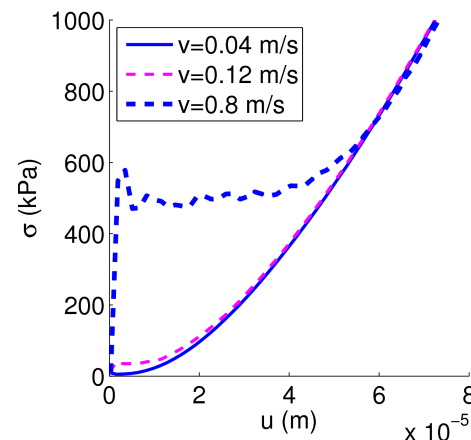
Précautions numériques :

- influence du pas de temps ?



Simulations d'un essai DNC, pour différents pas de temps

- influence de la vitesse de sollicitation numérique ?

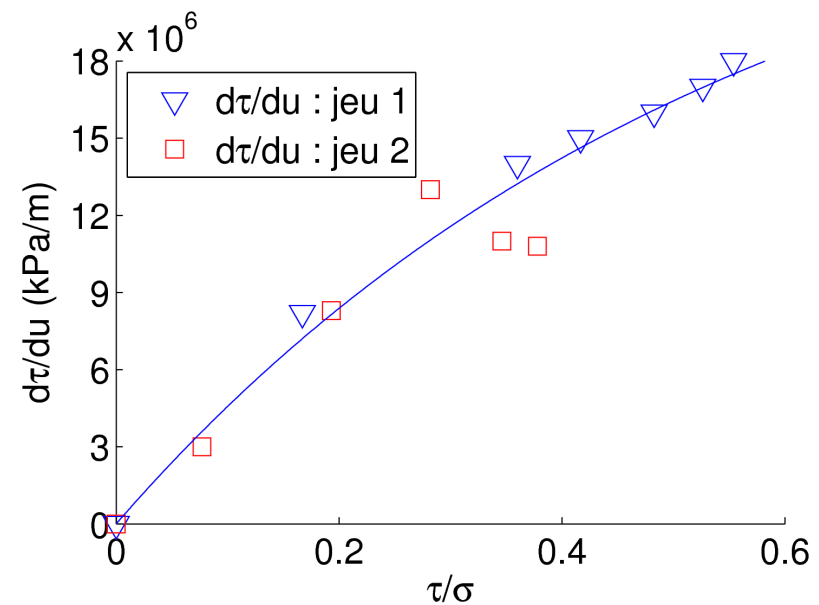
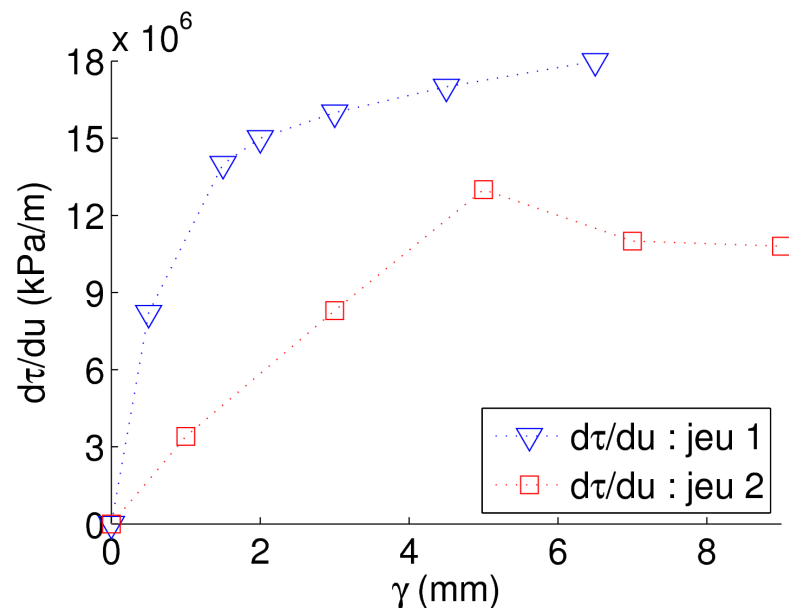


Simulations d'un essai DTC, pour différentes vitesses de sollicitations

Le modèle numérique de joint

Exploitation des résultats :

- une variable adéquate pour décrire le cisaillement d'un joint rocheux ? (dont dépend le lien entre τ et u par exemple)



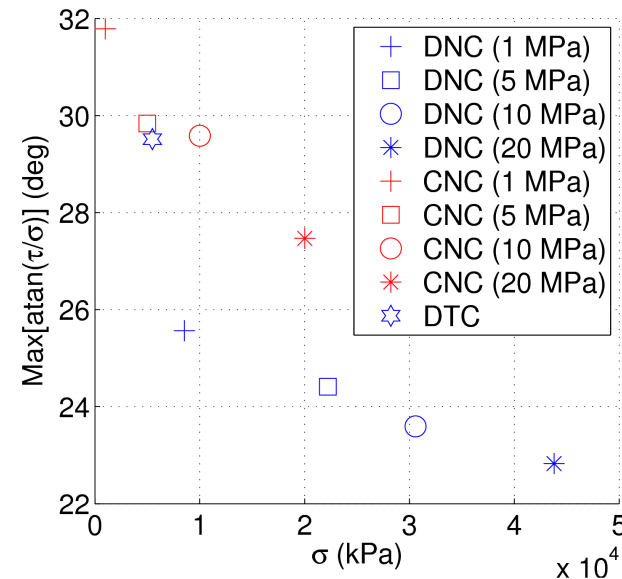
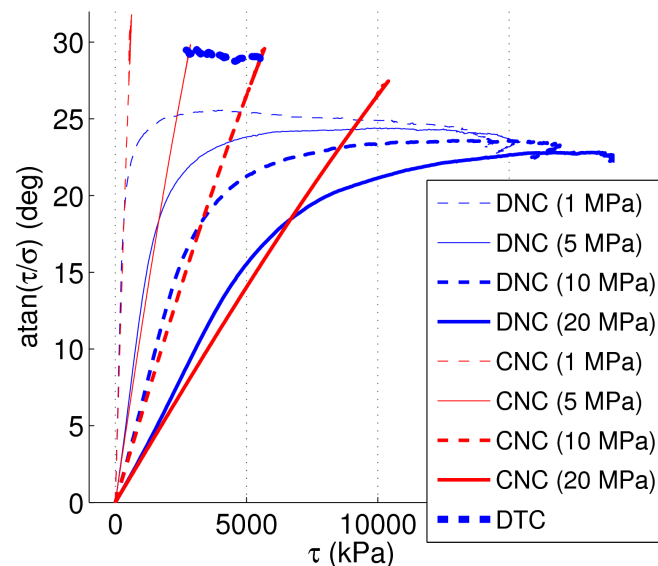
Diverses représentations de $d\tau/du$, mesurés lors d'essais DTC, pour différents états

=> variable pertinente = τ/σ

Le modèle numérique de joint

Exploitation des résultats :

- l'enveloppe des états de contraintes admissibles ? un angle de frottement macroscopique φ ? tel que $\tau_{max} = \sigma \times \tan(\varphi)$



Évolution de l'angle de frottement mobilisé, au cours de simulations numériques

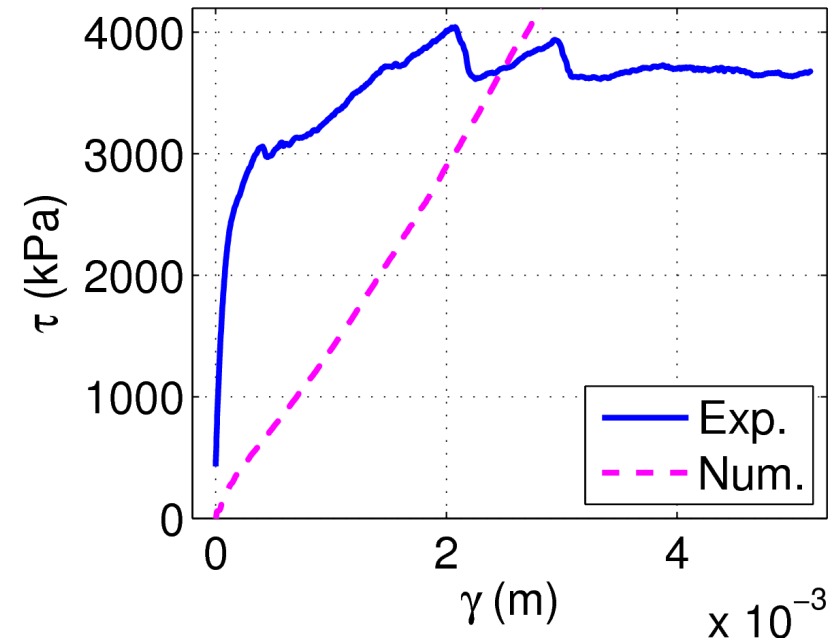
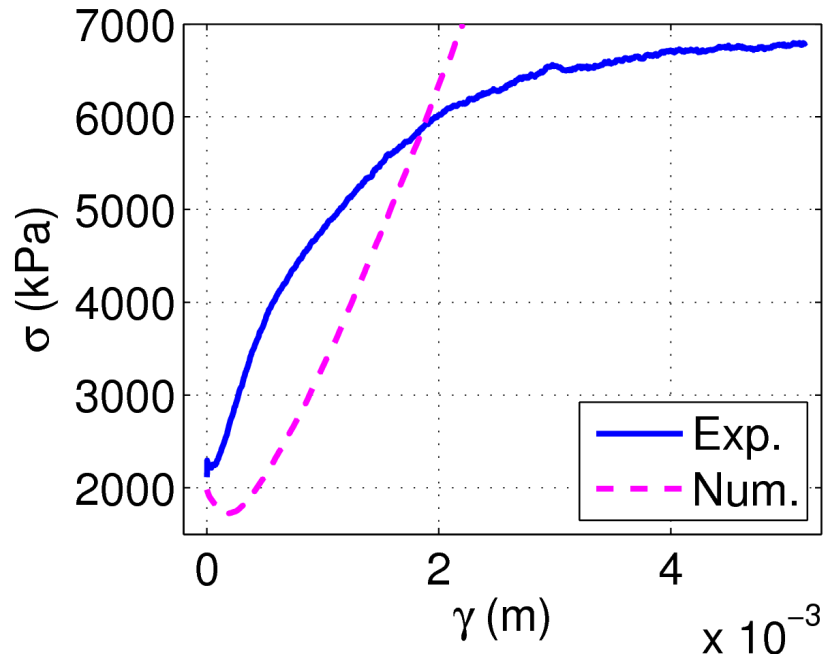
=>

- maximum de l'angle de frottement mobilisé dépend du type d'essai
- angle de frottement macroscopique (=maximum maximorum) dépend légèrement de σ

Le modèle numérique de joint

Comparaisons à l'expérience : tests sur du gneiss des "Rochers de Valabres" (LRPC, Toulouse)

- essai DNC

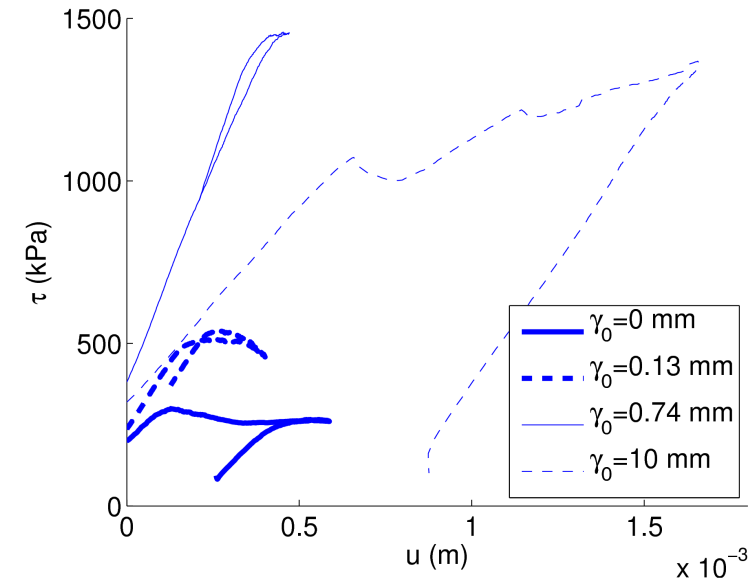
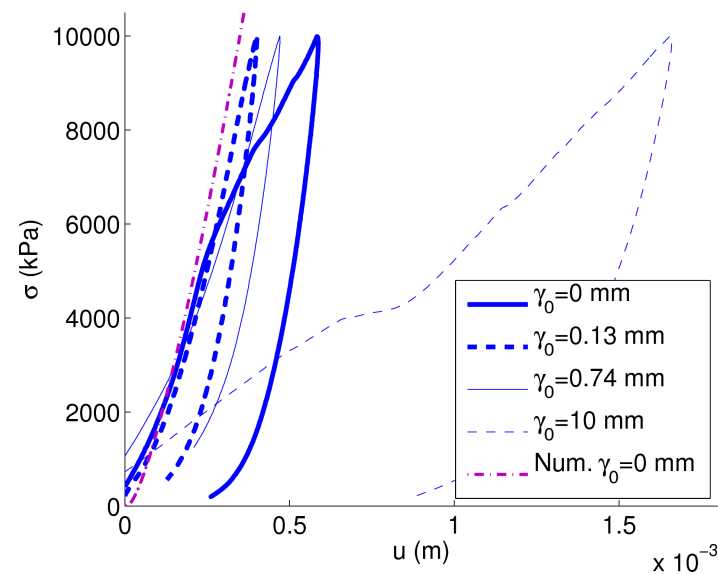


Comparaison à l'expérience : essai DNC

Le modèle numérique de joint

Comparaisons à l'expérience : tests sur du gneiss des "Rochers de Valabres" (LRPC, Toulouse)

- essai DTC



Résultats expérimentaux : essai DTC

=>

- raideur normale numérique cohérente
- influence de u sur τ , croissante avec le cisaillement (τ/σ , et non γ), vérifiée

Une loi INL de joint rocheux

Généralités sur les lois de comportements :

Prop: $\exists M_h$ reliant les vecteurs $\vec{d}\sigma$ et $\vec{d}l = \vec{\lambda} \|\vec{d}l\|$, avec $M_h = M_h(\vec{\lambda})$:

$$\vec{d}\sigma = \begin{pmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{pmatrix} = M_h(\vec{\lambda}) \vec{d}l = M_h(\vec{\lambda}) \begin{pmatrix} d\gamma \\ du \end{pmatrix}$$

Dépendance vis-à-vis de $\vec{\lambda}$:

- $M_h = cste \forall \vec{\lambda} \Rightarrow \vec{d}\sigma(-\vec{d}l) = -M_h(-\vec{\lambda})\vec{d}l = -M_h(\vec{\lambda})\vec{d}l = -\vec{d}\sigma(\vec{d}l)$
comportement élastique...

- variations continues de $M_h(\vec{\lambda})$

lois incrémentalement non linéaires

Une loi INL de joint rocheux

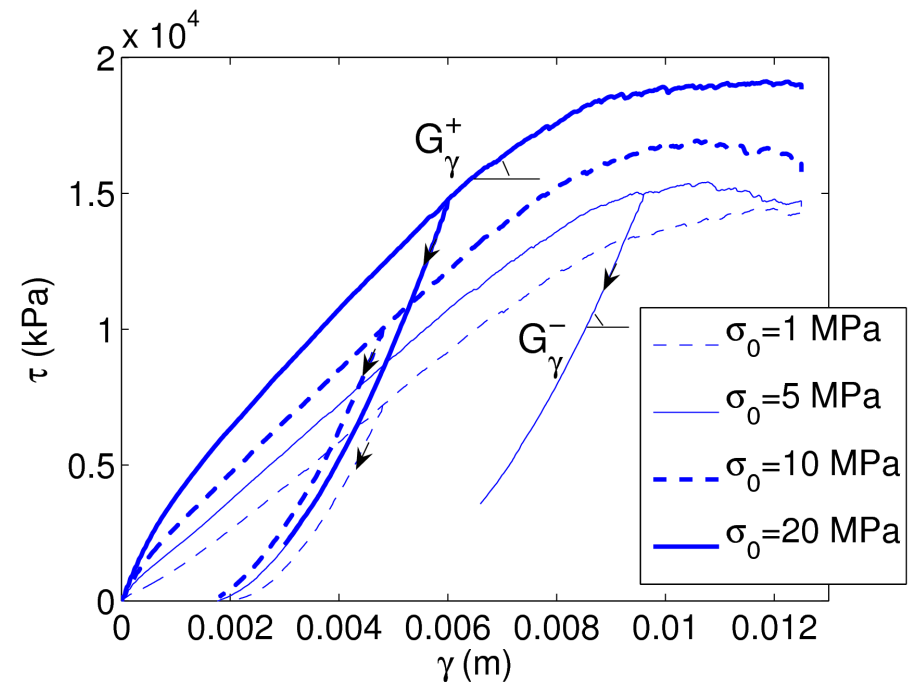
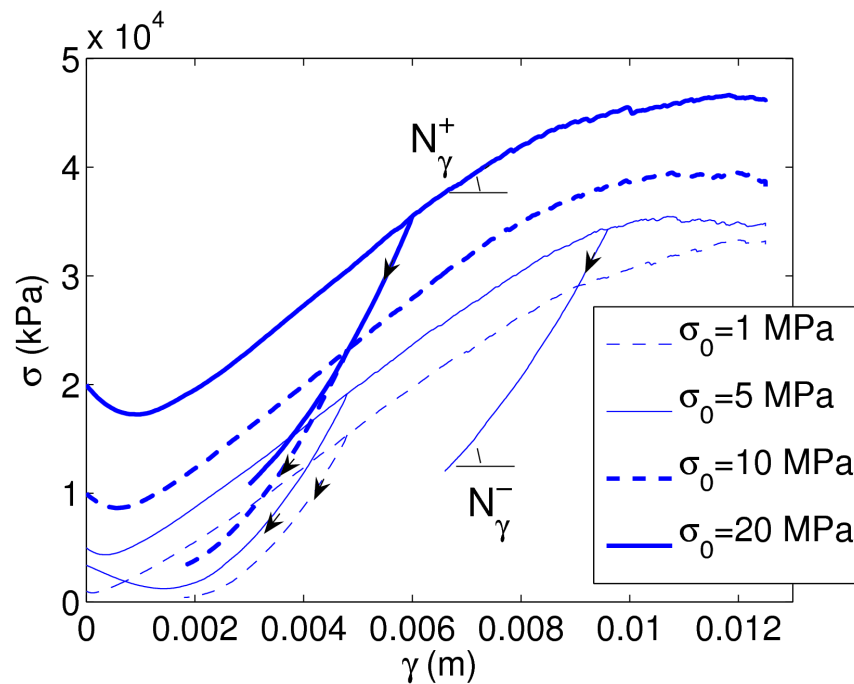
Définition d'une loi incrémentalement non linéaire :

à partir de deux chemins de calibration

- un chemin de cisaillement à déplacement normal constant (DNC)

($du=0; d\gamma=cste$)

=> Utilisation du modèle numérique



Définition de quatre modules, à partir du chemin de calibration DNC

Une loi INL de joint rocheux

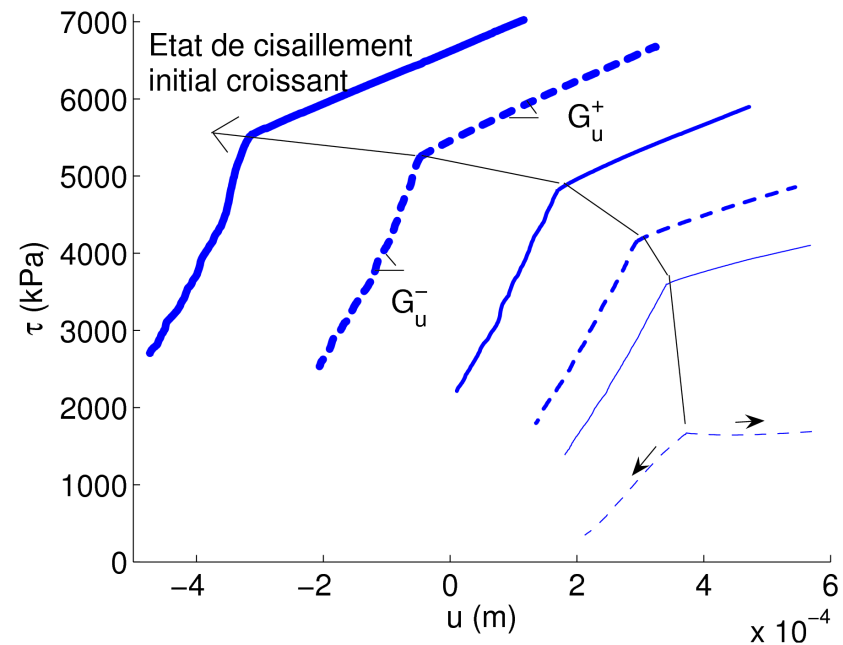
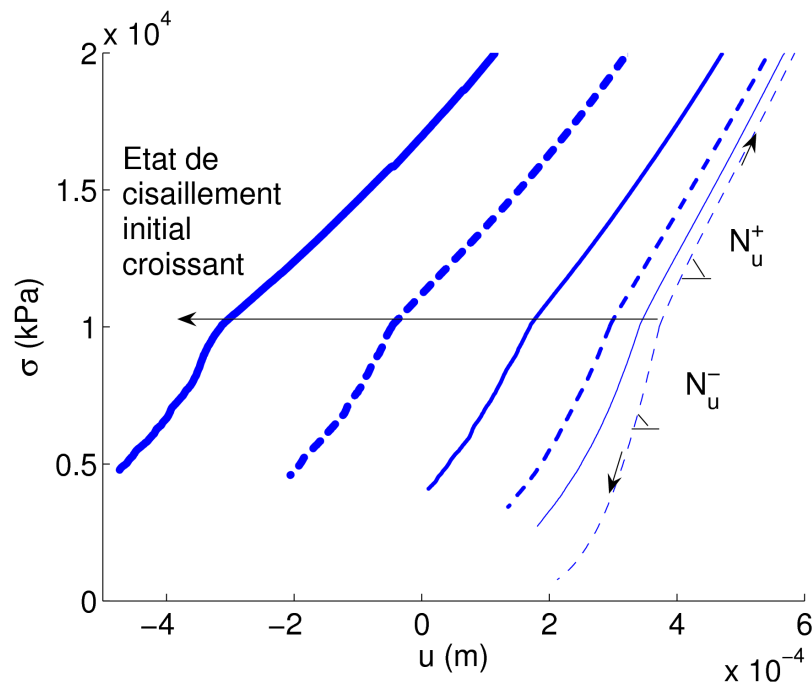
Définition d'une loi incrémentalement non linéaire :

à partir de deux chemins de calibration

- un chemin de compression à déplacement tangentiel constant (DTC)

($du=cste; dy=0$)

=> Utilisation du modèle numérique



Définition de quatre autres modules, à partir du chemin de calibration DTC

Une loi INL de joint rocheux

Écriture de la loi de comportement INL :

- pour une sollicitation à déplacement normal constant (DNC) : $du=0; d\gamma=cste$

$$\begin{array}{ll} d\sigma = N_y^+ \times d\gamma & \text{si } d\gamma > 0; \\ d\tau = G_y^+ \times d\gamma & \end{array} \quad \text{Ou} \quad \begin{array}{ll} d\sigma = N_y^- \times d\gamma & \text{si } d\gamma < 0 \\ d\tau = G_y^- \times d\gamma & \end{array}$$

- pour une sollicitation à déplacement tangentiel constant (DTC) : $du=cste; d\gamma=0$

$$\begin{array}{ll} d\sigma = N_u^+ \times du & \text{si } du > 0; \\ d\tau = G_u^+ \times du & \end{array} \quad \text{Ou} \quad \begin{array}{ll} d\sigma = N_u^- \times du & \text{si } du < 0 \\ d\tau = G_u^- \times du & \end{array}$$

Calibration de la loi : définir correctement ces 8 modules pour retrouver un comportement connu (celui du modèle numérique)

Une loi INL de joint rocheux

Écriture de la loi de comportement INL :

- pour une sollicitation quelconque : $du = cste_1$; $d\gamma = cste_2$

* formalisme INL (Darve & Labanieh, 1982)

$$\begin{pmatrix} d\sigma \\ d\tau \end{pmatrix} = \frac{P^+ + P^-}{2} \begin{pmatrix} du \\ d\gamma \end{pmatrix} + \frac{P^+ - P^-}{2 \|\vec{dl}\|} \begin{pmatrix} du^2 \\ d\gamma^2 \end{pmatrix} \quad P^+ = \begin{pmatrix} N_u^+ & N_\gamma^+ \\ G_u^+ & G_\gamma^+ \end{pmatrix} \quad P^- = \begin{pmatrix} N_u^- & N_\gamma^- \\ G_u^- & G_\gamma^- \end{pmatrix}$$

* formalisme quadri-linéaire : résultats proches (identiques pour calibration), mais calculs analytiques possibles (hyp sur les signes de du et dγ)

$$\begin{pmatrix} d\sigma \\ d\tau \end{pmatrix} = \frac{P^+ + P^-}{2} \begin{pmatrix} du \\ d\gamma \end{pmatrix} + \frac{P^+ - P^-}{2} \begin{pmatrix} |du| \\ |d\gamma| \end{pmatrix}$$

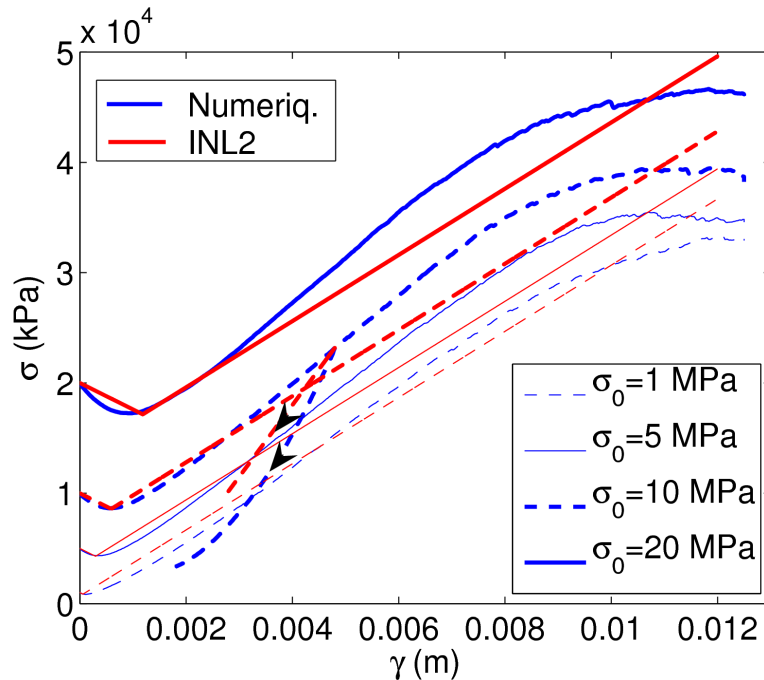
Validation de la loi :

prédictions de la loi de comportement
= comportement (du modèle) le long d'un chemin quelconque ?

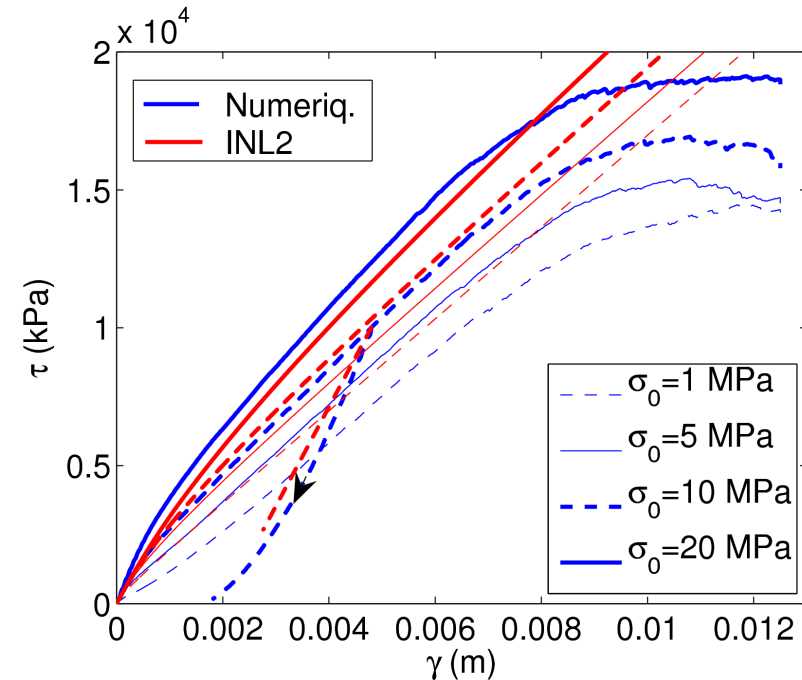
Une loi INL de joint rocheux

Calibration de la loi de comportement INL : chemin DNC

- évolution de $N_V^{+/-}$ au passage d'un angle caractéristique $\tau = \sigma \times \tan(\varphi_c)$



- décroissance exponentielle de G_V^+ au cours du cisaillement (τ/σ)

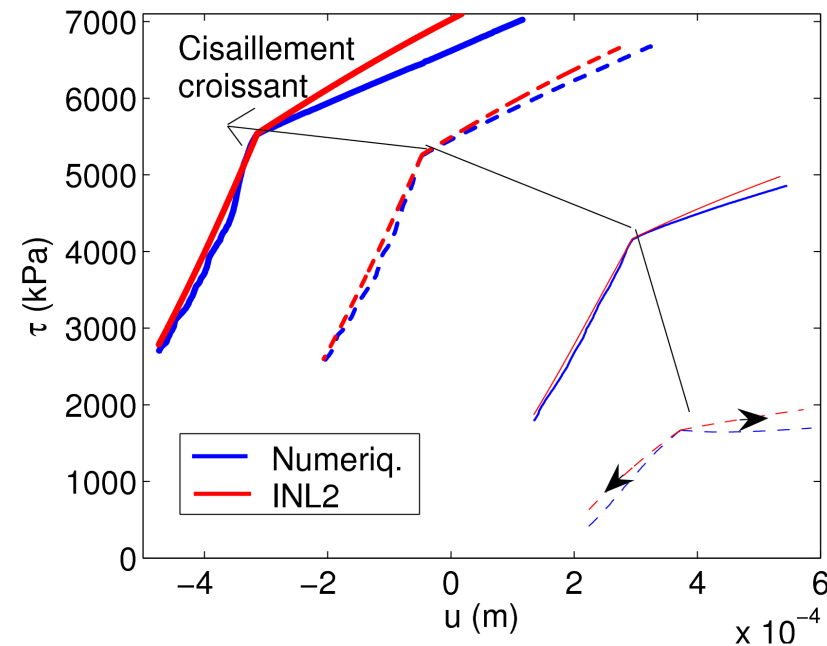
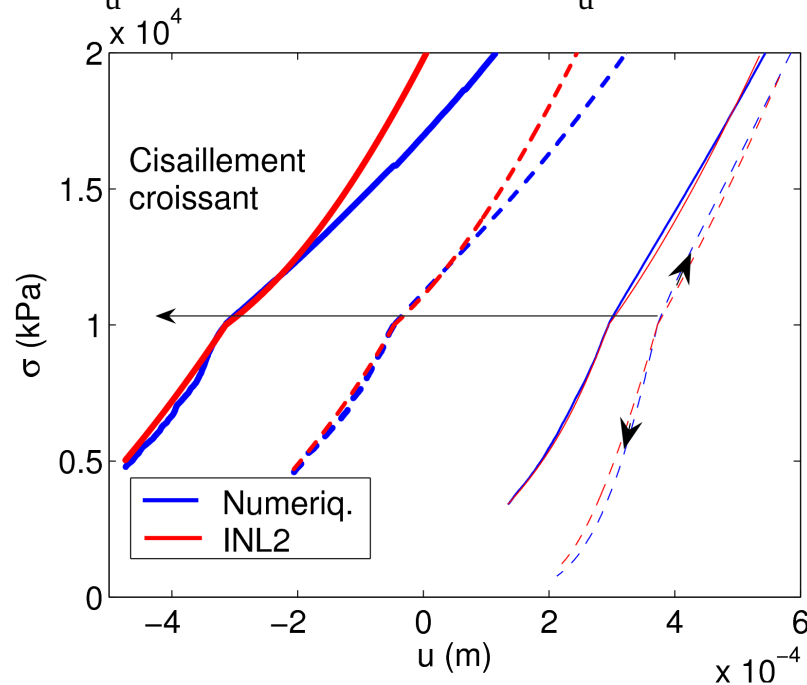


Comparaisons loi INL – modèle numérique : chemins DNC

Une loi INL de joint rocheux

Calibration de la loi de comportement INL2 : chemin DTC

- croissance de N_u^+ avec σ
- décroissance de N_u^+ avec τ/σ
- N_u^- proportionnel à N_u^+
- croissance de G_u^+ avec τ/σ (et σ)
- G_u^- proportionnel à G_u^+

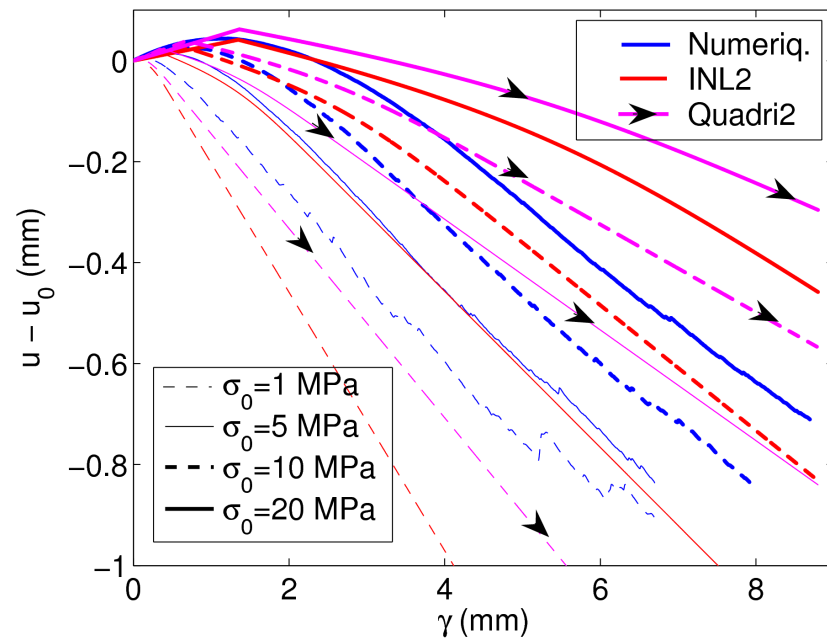
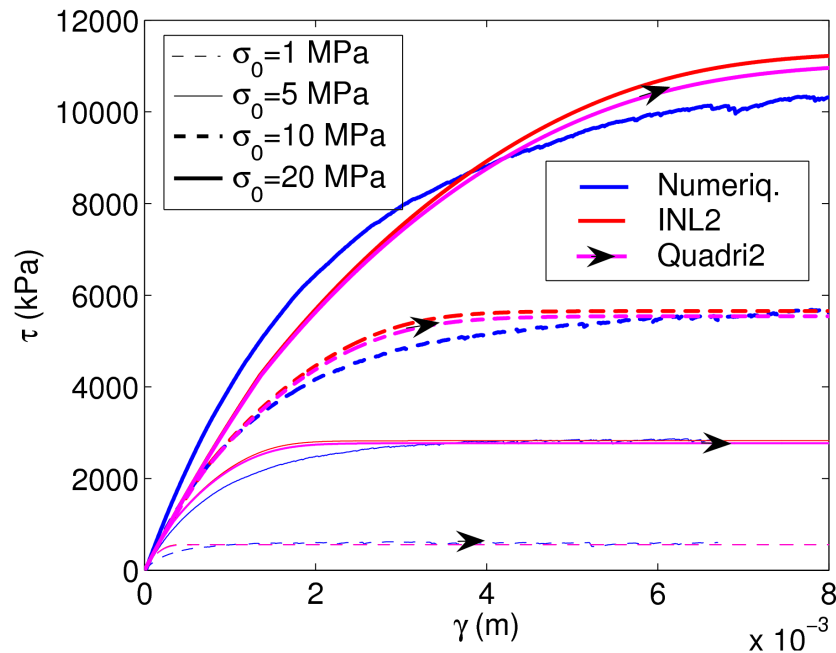


Comparaisons loi INL – modèle numérique : chemins DTC

9 paramètres (valeurs initiales et finales de modules, angles de frottement)

Une loi INL de joint rocheux

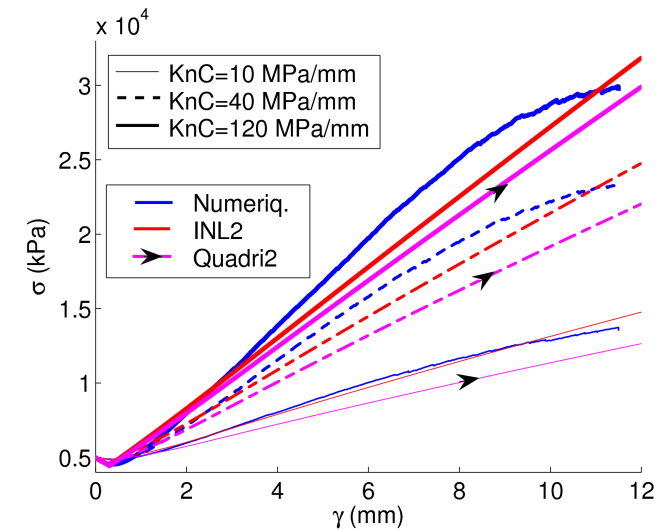
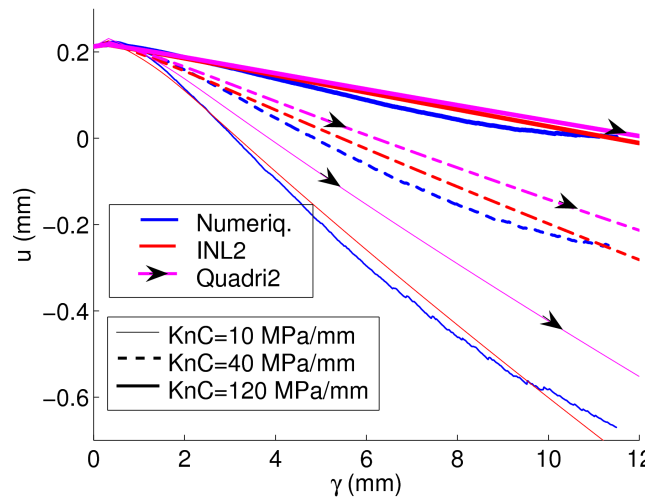
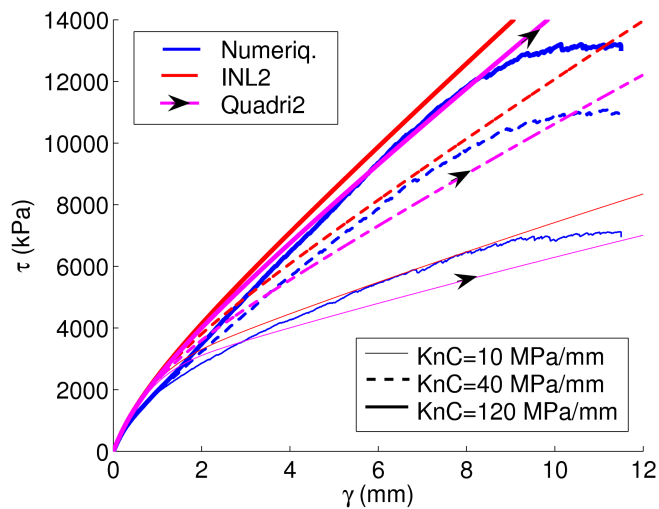
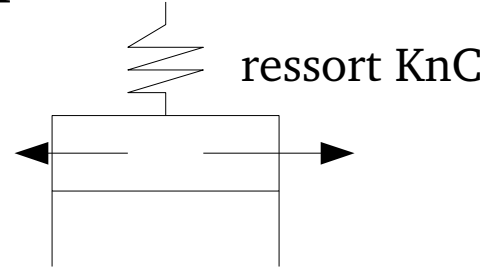
Validation de la loi de comportement INL2 : chemin CNC



Comparaisons loi INL – modèle numérique : chemins CNC

Une loi INL de joint rocheux

Validation de la loi de comportement INL : chemin à rigidité normale constante (KNC)



Comparaisons loi INL – modèle numérique : chemins KNC

=> loi validée

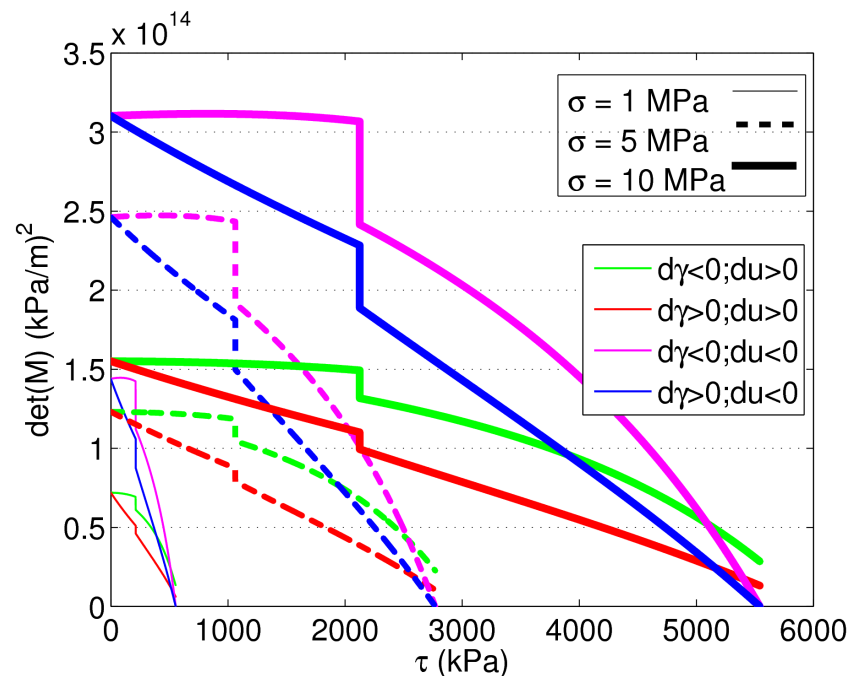
Une loi INL de joint rocheux

Analyse de la loi de comportement INL2 :

Enveloppe des états de contrainte admissibles = Critère de plasticité limite ?

Prop : États limités par $\tau_{max} = \sigma \times \tan(\varphi)$, φ apparaissant dans la définition des modules.

Cf annulation du déterminant de matrice constitutive :



Déterminants des matrices constitutives (quadri-linéaire), au cours du cisaillement, jusqu'au critère de MC

Le critère du travail du 2^d ordre

Différentes ruptures possibles dans la nature :

- sur le critère de plasticité limite (si on cherche à avoir $\tau \geq \sigma \times \tan(\varphi)$)



=> cf annulation de $\det(M_h)$

- mais aussi avant le critère de plasticité limite...

* de manière localisée :



Bande de cisaillement dans des billes de verre

=> (Rudnicki et Rice, 1975)

* de manière diffuse :



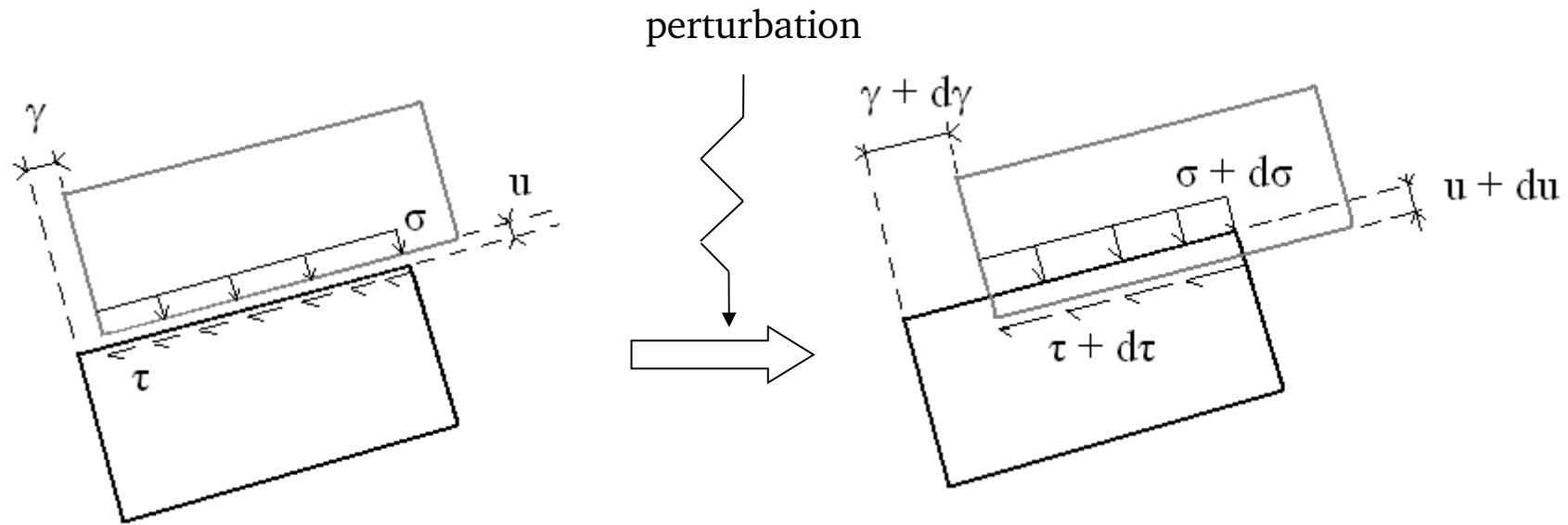
"Liquéfaction" d'un échantillon de sable

=> **critère du travail du second ordre**

(Darve *et al.*)

Le critère du travail du 2^d ordre

Le critère du travail du 2d ordre pour les joints rocheux :



Travail du 2d ordre : $d^2 w = \vec{dl} \cdot \vec{d\sigma} = du d\sigma + d\gamma d\tau$

Critère : $\forall \vec{dl}, \vec{d\sigma}, \vec{d\sigma} = M_h \vec{dl} : \underline{d^2 w = \vec{dl} \cdot \vec{d\sigma} > 0} \Rightarrow$ stabilité (donc rupture impossible)

Ou : Rupture suite à une sollicitation $\Rightarrow \vec{dl}, \vec{d\sigma} \quad d^2 w \leq 0$

Le critère du travail du 2^d ordre

Le critère du travail du 2d ordre pour les joints rocheux :

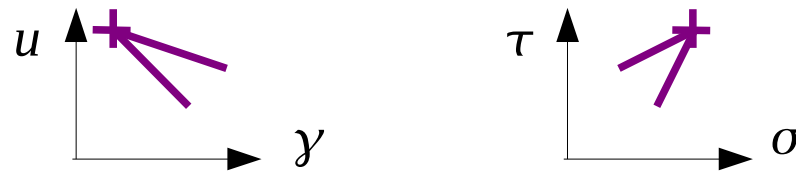
Prop: $d^2 w = \vec{dl} \cdot \vec{d\sigma} = {}^t \vec{dl} \vec{d\sigma} = {}^t \vec{dl} M_h(\vec{\lambda}) \vec{dl} = \|\vec{dl}\|^2 {}^t \vec{\lambda} M_h(\vec{\lambda}) \vec{\lambda}$

=> Signe de $d^2 w$ ne dépend que de la direction de sollicitation $\vec{\lambda}$

Déf :

- directions instables : les directions $\vec{\lambda} \Rightarrow d^2 w \leq 0$

Prop : si elles existent elles forment un cône : deux directions extrêmes annulent exactement $d^2 w$, les directions dans l'intervalle le rendent < 0



Ex de cônes de directions instables, représentés dans le plan des dplts, ou des contraintes

- domaine de bifurcation : les états du joint pour lesquels des directions instables existent...

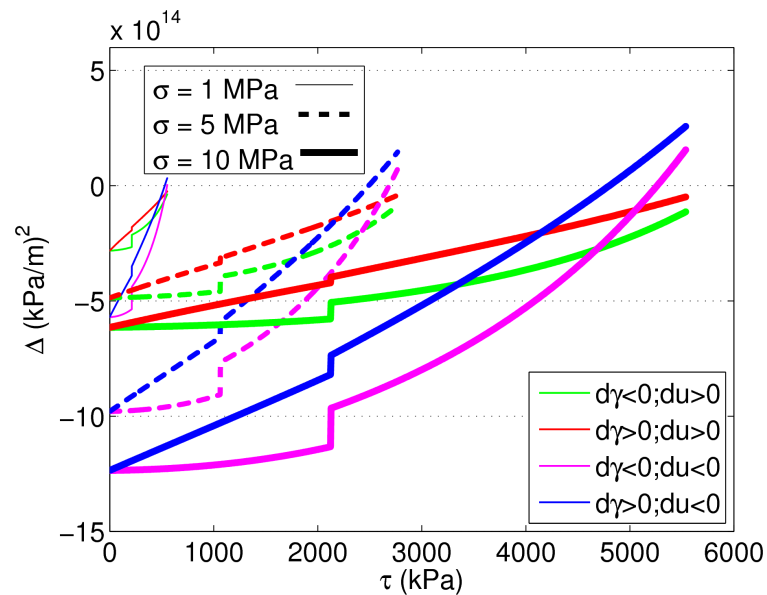
Le critère du travail du 2^d ordre

Le domaine de bifurcation

- Calculs analytiques avec la relation quadri linéaire (hyp sur les signes de du et dγ)

Domaine de bifurcation existe $\Leftrightarrow \Delta = (G_u^{+/-} + N_y^{+/-})^2 - 4 N_u^{+/-} G_y^{+/-} \geq 0$

Termes de couplage (dilatance...) > rigidités normales et tangentielles

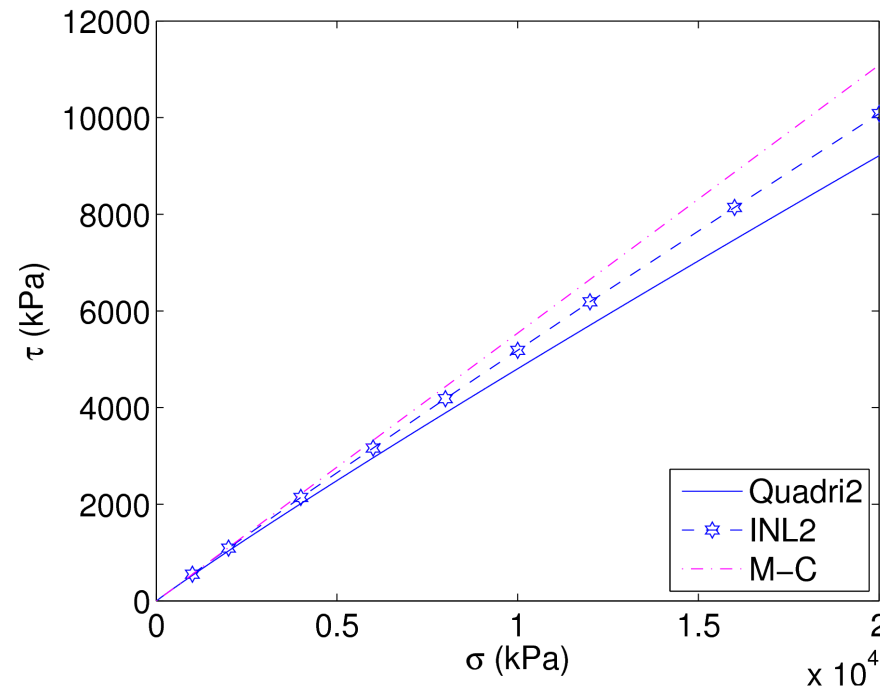


Évolution de Δ au cours du cisaillement

Le critère du travail du 2^d ordre

Le domaine de bifurcation

- Recherche INL2 => recherche "manuelle" de possibilité de directions instables



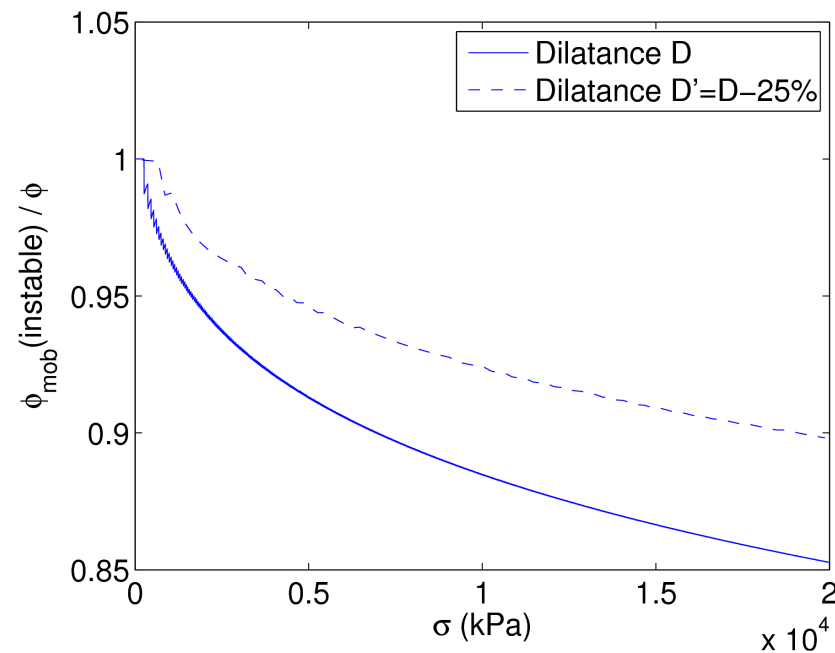
Frontière du domaine de bifurcation, dans le plan de Mohr

=> Concerne les états cisailés (avec influence de σ)

Le critère du travail du 2^d ordre

Influence de la dilatance sur le domaine de bifurcation

- Comparaison avec un nouveau comportement moins dilatant ($\sim -25\%$)



Angle de frottement à mobiliser pour atteindre le domaine de bifurcation

Diminution de la dilatance \Rightarrow Réduction du domaine de bifurcation

Le critère du travail du 2^d ordre

Les directions instables (cônes)

- Calculs analytiques => orientations du cône dans le plan de Mohr :

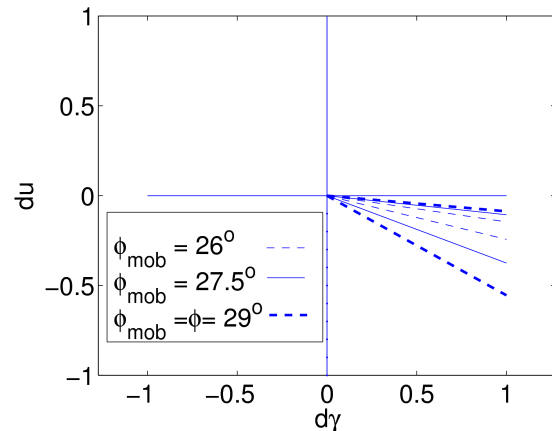
	$d\gamma < 0$	$d\gamma > 0$
$G_u > N_y$	$d\sigma > 0$	$d\sigma < 0$
$G_u < N_y$	$d\sigma < 0$	$d\sigma > 0$

=> Importance des termes de couplage

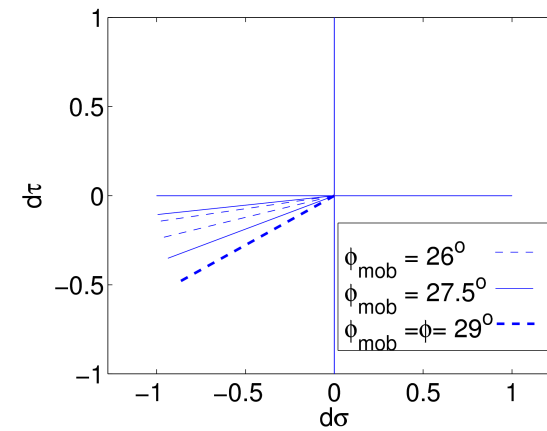
Le critère du travail du 2^d ordre

Les directions instables (cônes)

- Les cônes prédits par la loi retenue :



Plan des dplts



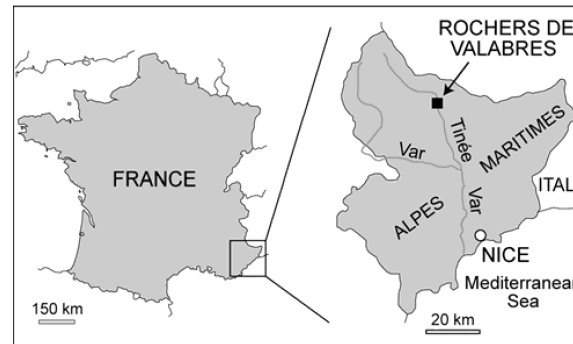
Plan des contraintes

- Ouverture des cônes au cours du cisaillement

- Mécanismes d'instabilité :

(charge en cisaillement + dilatance) \Leftrightarrow (baisse des contraintes)

Calcul des Rochers de Valabres



Vue sur le versant

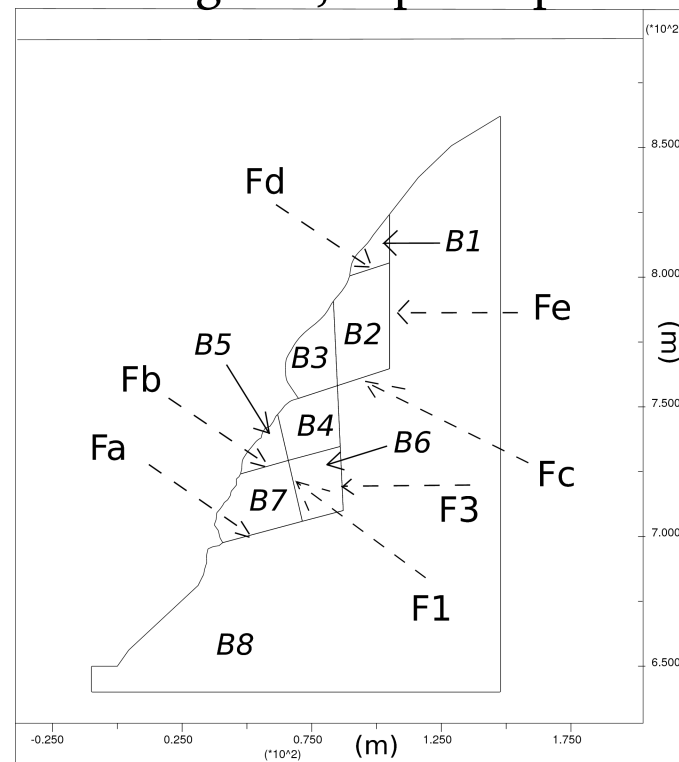


Vue sur la vallée

Calcul des Rochers de Valabres

Réalisation d'un modèle numérique

- stabilité du versant conditionnée par les joints uniquement (matrice saine)
 - coude de la vallée à cet endroit
- => Modèle 2D de blocs rigides, séparés par les joints, possible (UDEC)

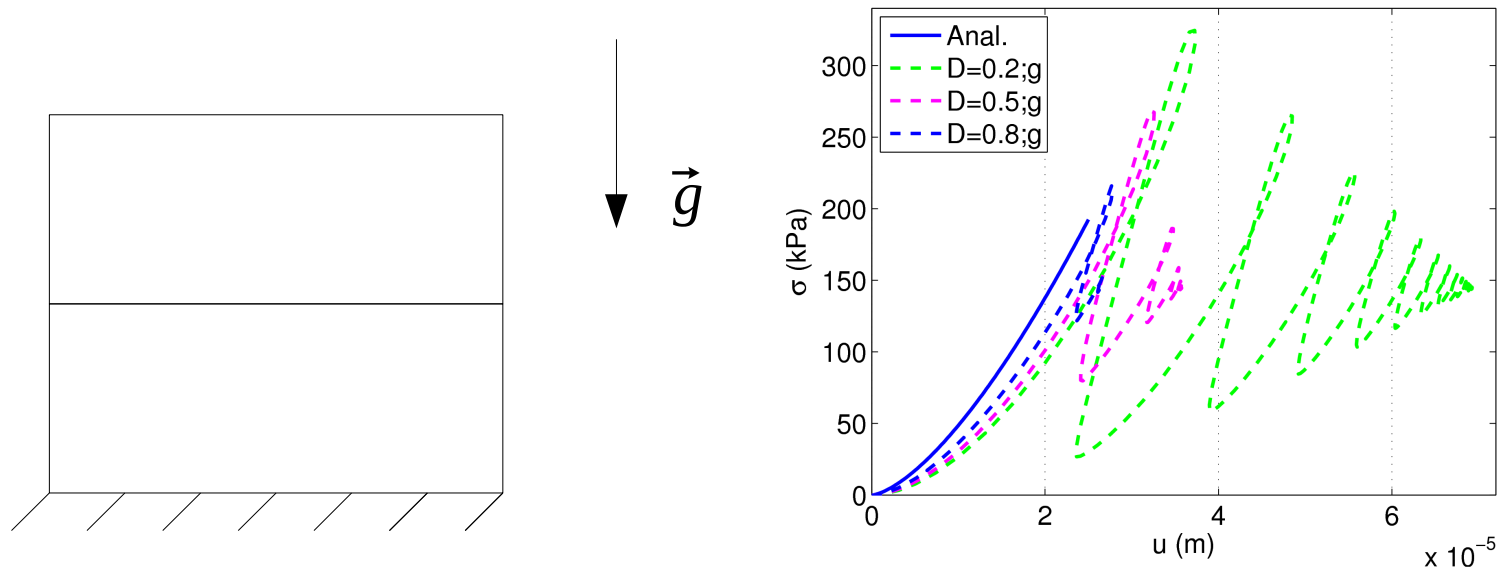


Géométrie du modèle UDEC

Calcul des Rochers de Valabres

Intégration de la loi INL2 dans UDEC :

- interaction entre blocs via les joints rocheux = loi INL2
- loi non élastique => quelques difficultés d'utilisation



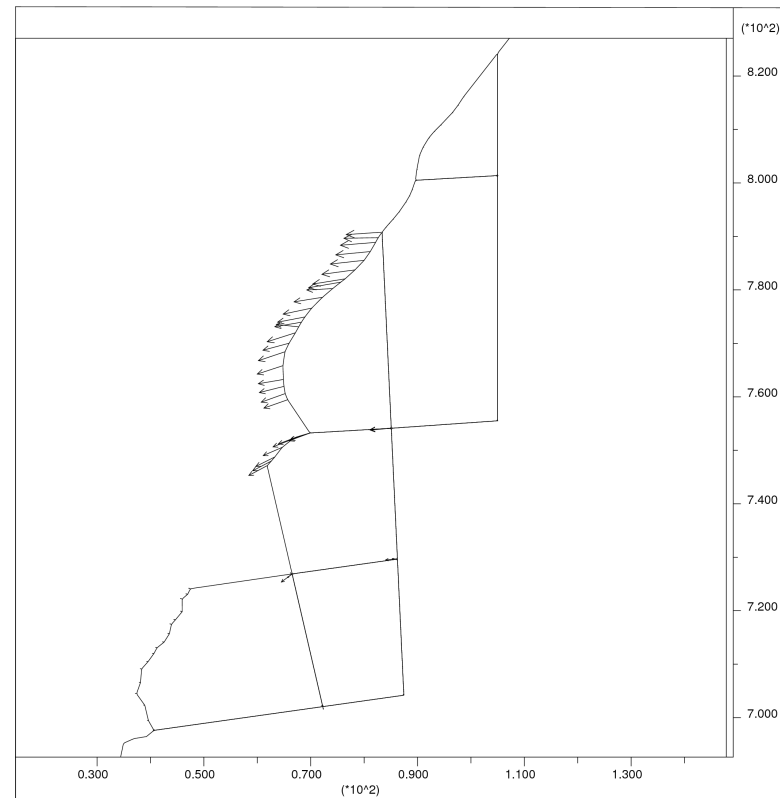
Simulation de l'enfoncement d'un bloc dans l'autre, sous l'effet de la gravité

=> Utilisation d'un amortissement élevé profitable
(à défaut d'une sollicitation quasi-statique)

Calcul des Rochers de Valabres

Simulation effectuée :

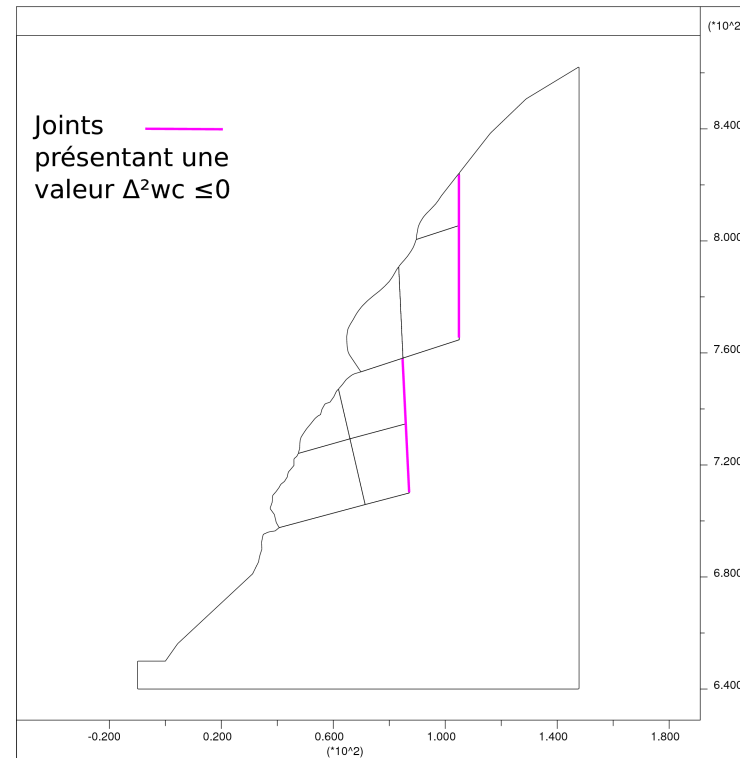
- histoire géologique (augmentation progressive de la gravité)
- effets de la suppression d'un bloc du massif, sur ce dernier ?



Champs de déplacements suite à la suppression du bloc

Calcul des Rochers de Valabres

Critère du travail du 2d ordre :



Fin d'application de la gravité : joints avec $d^2w < 0$

Dans ce cas de massifs rocheux, éboulement obtenu sans doute si la somme (sur un ensemble de joints critiques) des travaux locaux est nulle

Conclusions

Établissement d'un modèle numérique de joint rocheux (ayant subi un déplacement)

- réalisation facile d'essais mécaniques (DNC)
- investigation des couplages présentés par les joints rocheux : dilatance, effet (réel) des compressions sur τ
- pertinence de τ/σ pour décrire le cisaillement
- conclusions justifiées par l'expérience

Définition d'une loi INL de joint rocheux : la loi INL2

- formalisme avantageux
- calibrée et validée sur le modèle numérique
- définition permet de prendre complètement en compte les couplages
- description "naturelle" d'un critère de type Mohr-Coulomb

Conclusions

Étude d'un nouveau critère de rupture pour les éboulements, en lien avec la relation constitutive

- le critère du travail du 2d ordre : son intérêt
- domaine de bifurcation correspond à des états cisailés
- sollicitations menant à l'instabilité (ex : rupture) = baisse des contraintes équivalant à une charge en cisaillement + dilatance
- importance des termes de couplage => de leur prise en compte dans les modélisations !

Application au calcul des Rochers de Valabres

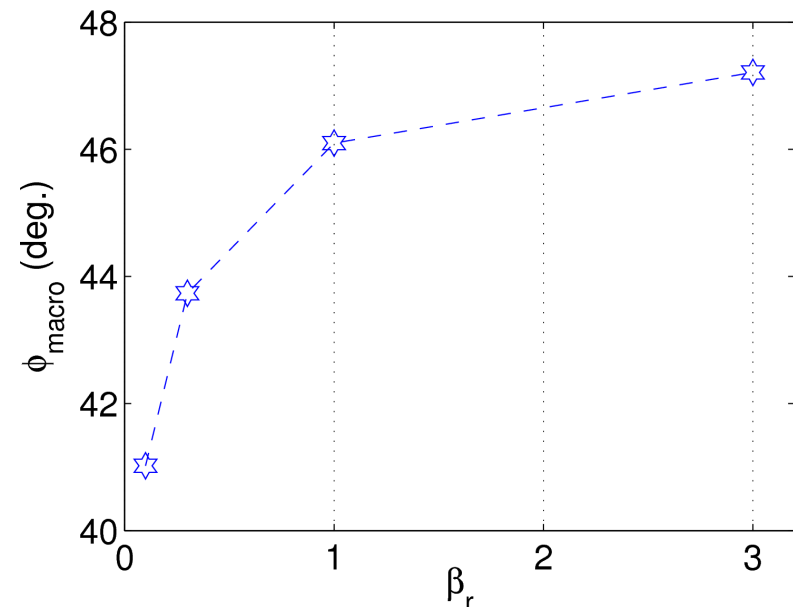
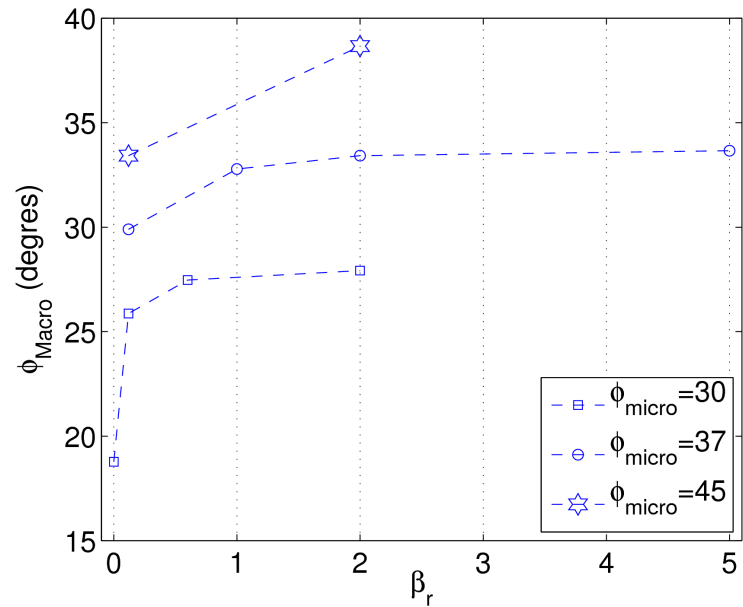
- utilisation de la loi INL2 dans UDEC
- observation de directions instables correspondant aux directions du chargement simulé

Fin...



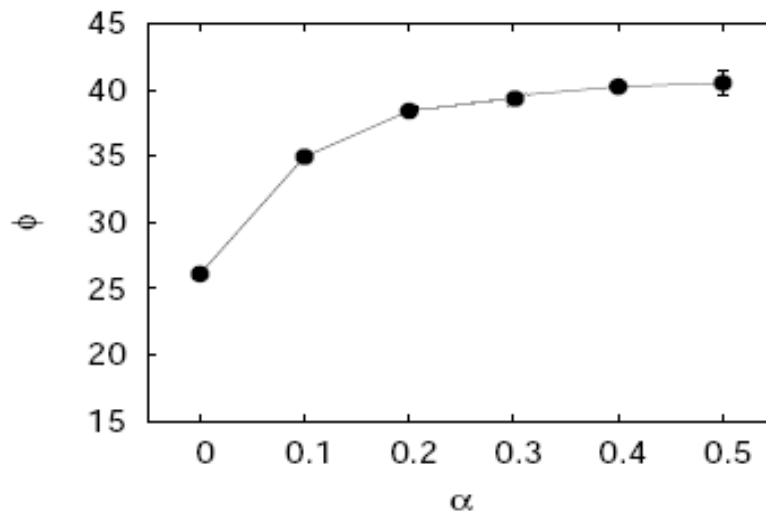
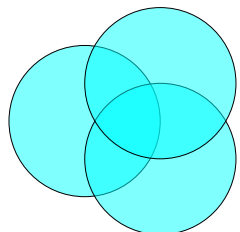
Éboulement aux Drus (massif du Mont Blanc), été 2003

Influence de la LTM



Dépouillement de Plassiard *et al.*

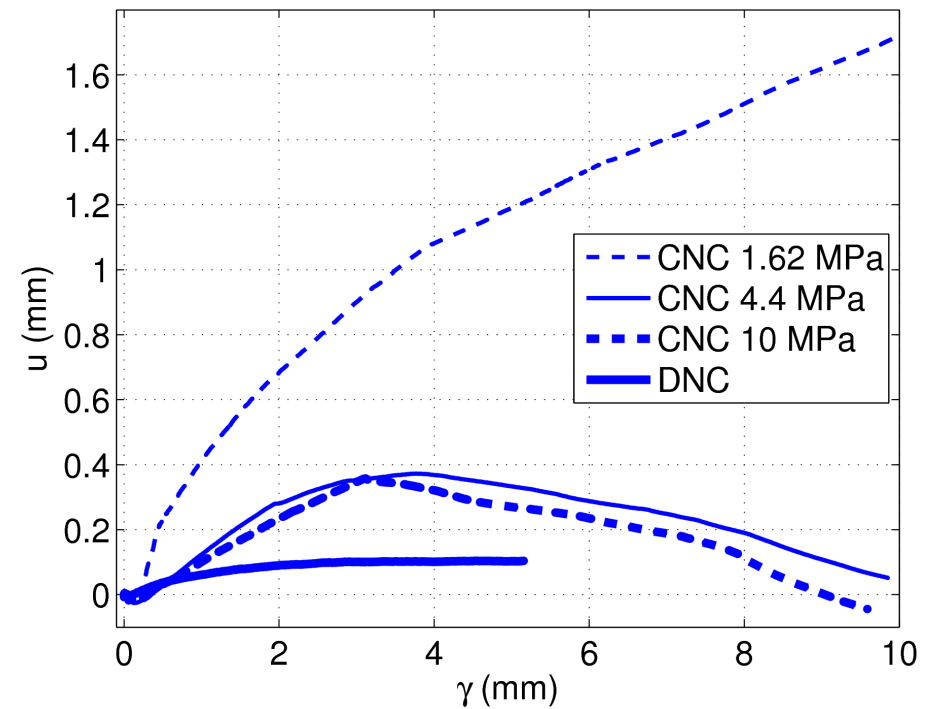
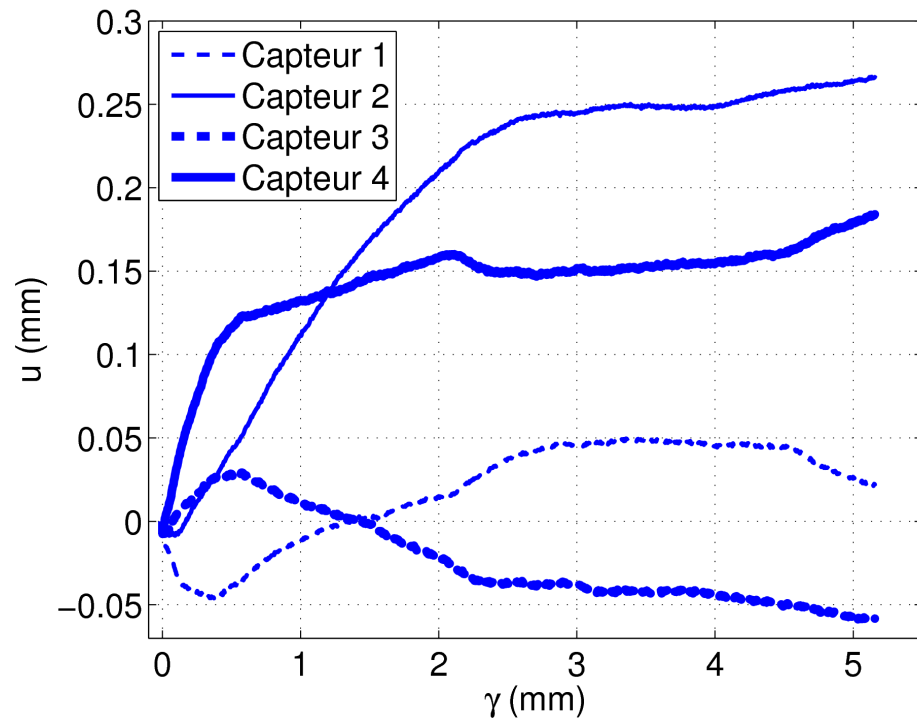
Lien avec l'utilisation de "clumps"
(Szarf *et al.*)



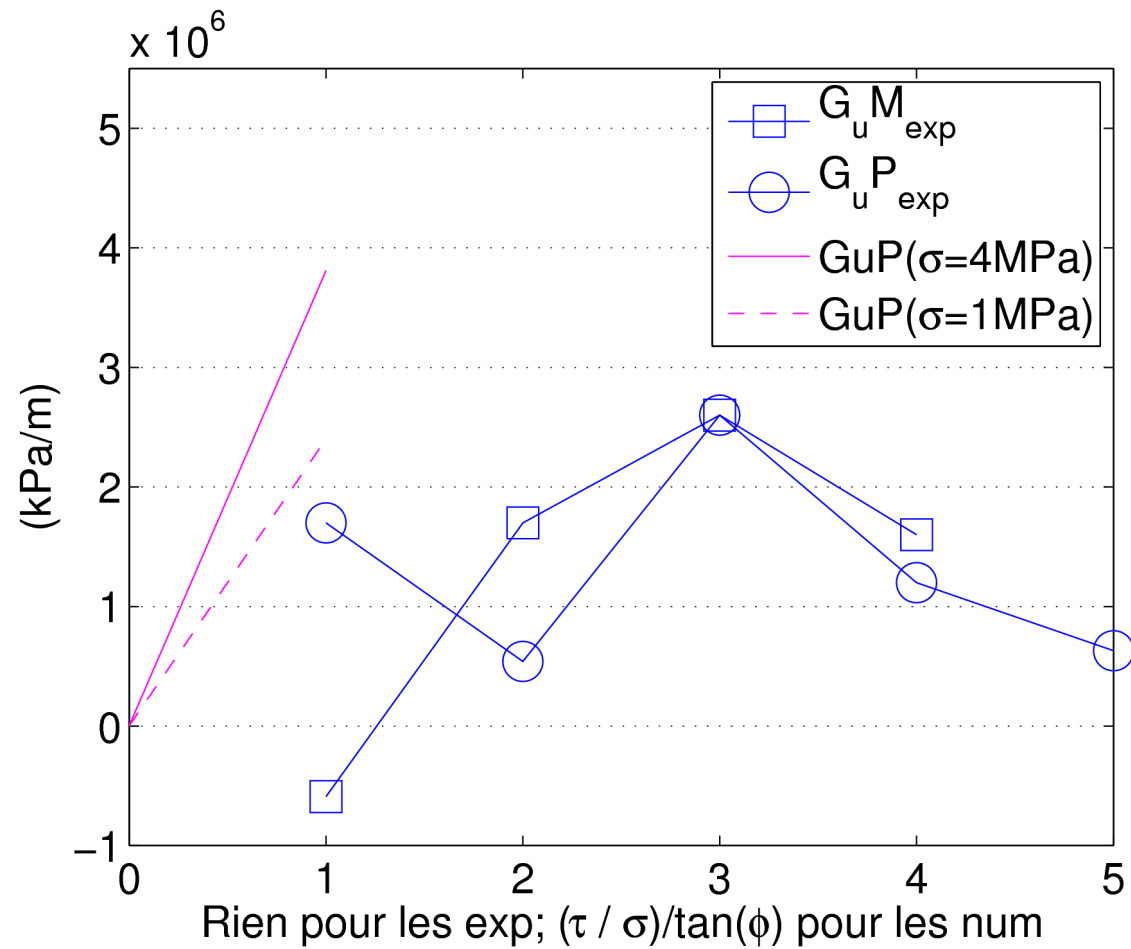
Photos essais LRPC



Analyse de l'essai DNC exp.



Comparaisons avec les essais



Le respect d'un critère de MC

