

Opération Cadoroc
Journée de restitution

Aix en Provence 10 octobre 2017



Photo CETE Méditerranée

Discontinuités
rocheuses
Influence de l'eau

Jean-François Serratrice

- L'eau dans les massifs rocheux
- Problématique au laboratoire
- Un programme expérimental

L'eau dans les massifs rocheux

✓ L'eau est présente dans les massifs rocheux

- Failles, cavités, discontinuités, pores, ...
- Elle y est conservée ou en mouvement
- Ses fluctuations sont liées aux conditions environnementales et facteurs entropiques *A toutes les échelles de temps et d'espace*

✓ Ses effets sont multiples

- Mécaniques
- Thermiques
- Agent de diffusion, de dissolution et d'altération
- Erosion, colmatage
- Gel, etc.

*Effets mécaniques
étudiés ici*



L'eau dans les massifs rocheux

Site du Pont du Gard



Photos CETE Méditerranée

La karstification se développe dans la structure du massif juronien, ici la stratification S_0

S_0



L'eau dans les massifs rocheux

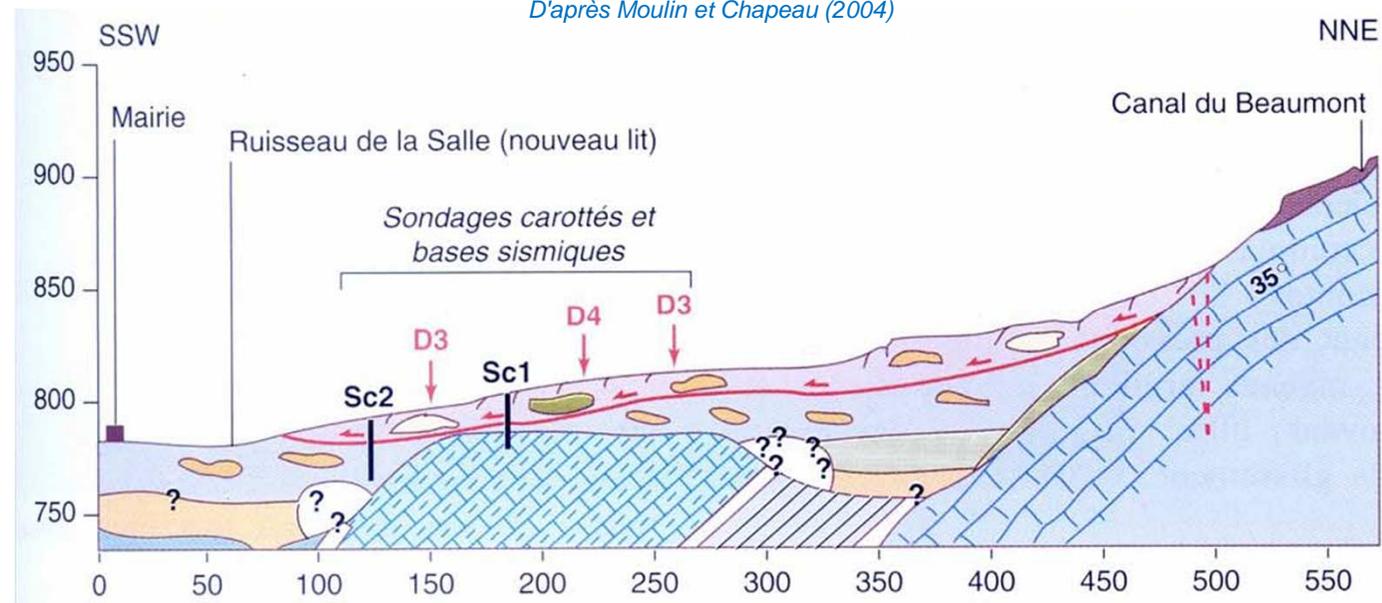


france3-regions.francetvinfo.fr

La Salle en Beaumont (Isère)
08/01/1994

"Le paramètre déclenchant semble de toute évidence l'accumulation d'eau fissurale [dans les calcaires en aval pendage] faisant remonter la charge hydraulique et créant des pressions insupportables par les niveaux argileux de couverture, pouvant aller jusqu'au soulèvement, puis au glissement."

D'après Moulin et Chapeau (2004)



L'eau dans les massifs rocheux



Document pluiesextremes.meteo.fr

Barrage de Malpasset 02/12/1959



Document azurelive.com



D'après Maurenbrecher (2009)

Au laboratoire

✓ Dans les roches (tendres) fissurées

- Qui cassent préférentiellement sur des discontinuités naturelles

✓ Le rôle mécanique de l'eau se trouve à la croisée de deux questions

- La mesure des propriétés de résistance

Résistance de pic, résistance résiduelle, dilatance

- Le découplage entre les interactions "effectives" et la "pression interstitielle" dans les discontinuités

Indépendamment du rôle de la pression interstitielle dans la matrice poreuse



Eprouvette triaxiale (diamètre 100 mm)

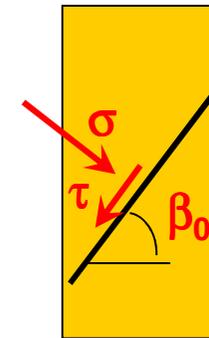
Au laboratoire

- ✓ Exemple d'une marne fissurée gonflante

Essais triaxiaux CD HP



Essai triaxial à haute pression, éprouvettes après essai (diamètre 50 mm)

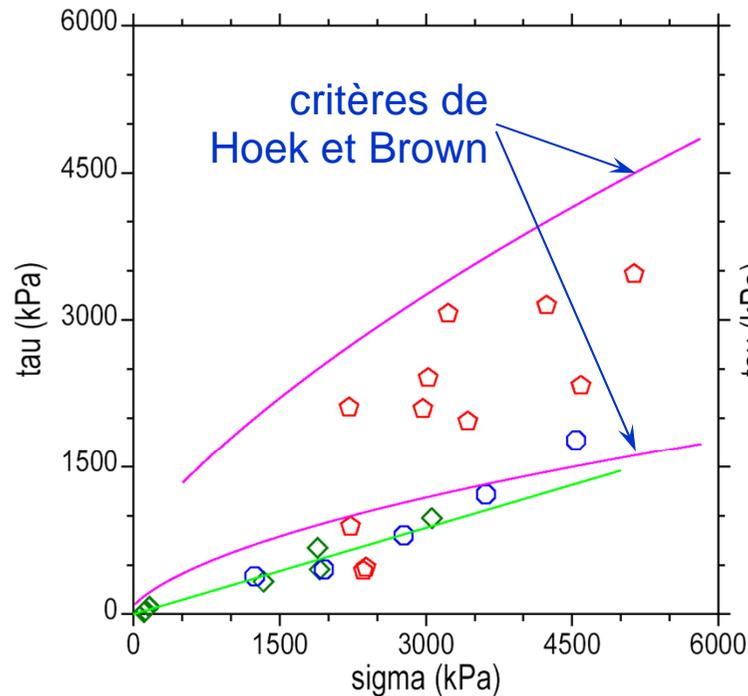


Eprouvette fissurée

L'interprétation des essais triaxiaux doit être effectuée dans le plan (σ, τ) où σ est contrainte normale et τ la contrainte de cisaillement sur le plan de la discontinuité de pente β_0

Comportement des roches tendres fissurées

Marne fissurée gonflante Essais triaxiaux CD HP



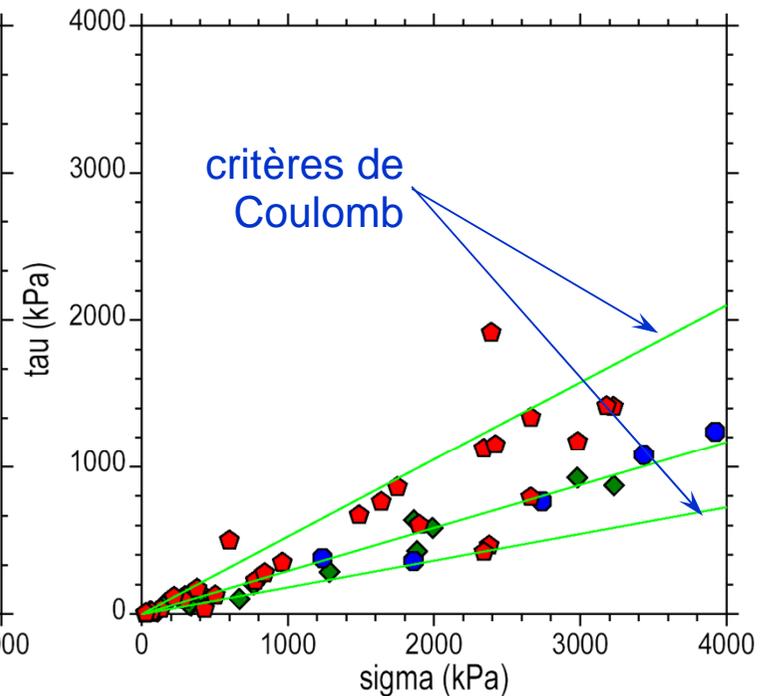
Résistances de pic ou de pseudo-pic

◇ Blocs 2013 Essais 2013

○ Blocs 2013 Essais 2014

◇ Blocs 2014 Essais 2014

Hoek sigci 400 et 4000 mi 7 et 9



Résistances résiduelles

◇ Blocs 2013 Essais 2013

● Blocs 2013 Essais 2014

◇ Blocs 2014 Essais 2014

tg 0,18 0,29 0,52 phi' 10,3 16,3 27,7 °

Programme expérimental prospectif

✓ Problématique

- Contribution à l'étude des mécanismes de déclenchement des instabilités sous l'effet de l'eau
- Amélioration de l'interprétation des essais triaxiaux dans les sols indurés et les roches tendres

✓ Objectifs

- Mesure les propriétés de cisaillement des discontinuités
- En condition de faible confinement
- Avec prise en compte du rôle mécanique de l'eau

✓ Tendances du moment dans la littérature

- Programmes expérimentaux au laboratoire sur la base d'essais triaxiaux et d'éprouvettes pré-découpées

Programme expérimental prospectif

✓ Essais triaxiaux

- Très faibles confinements et très faible raideur
- Une seule discontinuité
- Roche résistante (éponges non friables)
- Pression "interstitielle" contrôlée
- Dégradation des éponges

✓ Perspectives

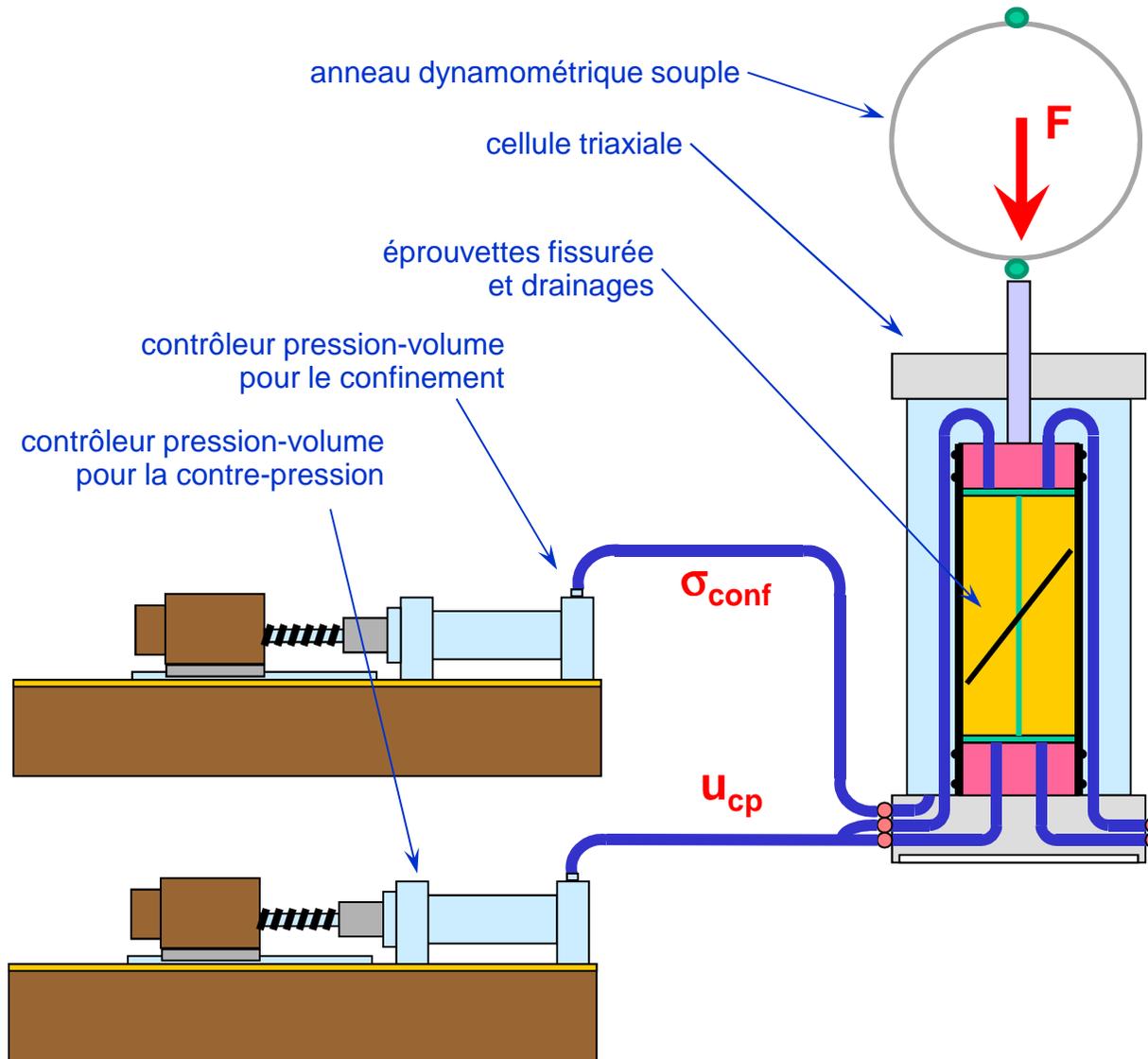
- Remplissage argileux
- Réseau de discontinuités
- Hautes pressions (eau)
- Etat "contrôlé" des éponges
- Etc.

Mécanismes de surface



Eprouvette triaxiale
(diamètre 50 mm)

Essais triaxiaux Montage



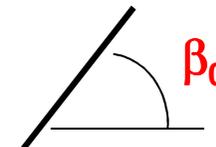
◀ Montage expérimental

Procédure



- 1) Consolidation isotrope (u_{cp} , σ_{conf})
- 2) Chargement drainé jusqu'à F_0
- 3) Contre-pression croissante jusqu'à σ_{conf}

▼ Angle de la discontinuité



Essais triaxiaux Eprouvettes

✓ Eprouvettes pré-découpées (calcaire blanc)

$\beta_0 = 34^\circ$

$\beta_0 = 45^\circ$

$\beta_0 = 58^\circ$

Calcaire urgonien, La Mède (Bouches du Rhône)



Eprouvettes triaxiales prédécoupées, diamètres 50 mm



tête triaxiale

discontinuité
prédécoupée
 $\beta_0 = 58^\circ$

éprouvette

drain latéral

- mèche de géotextile
- rainures le long de quatre génératrices

embase triaxiale

Programme d'essais triaxiaux

✓ Chargements monotones

- Condition drainée
- Condition non drainée
- Mesure des propriétés de résistance

Résistance de pic, seuil, dilatance

Le chargement axial est réalisé par la presse triaxiale

✓ Chargements à u croissante

- Simulation des déclenchements

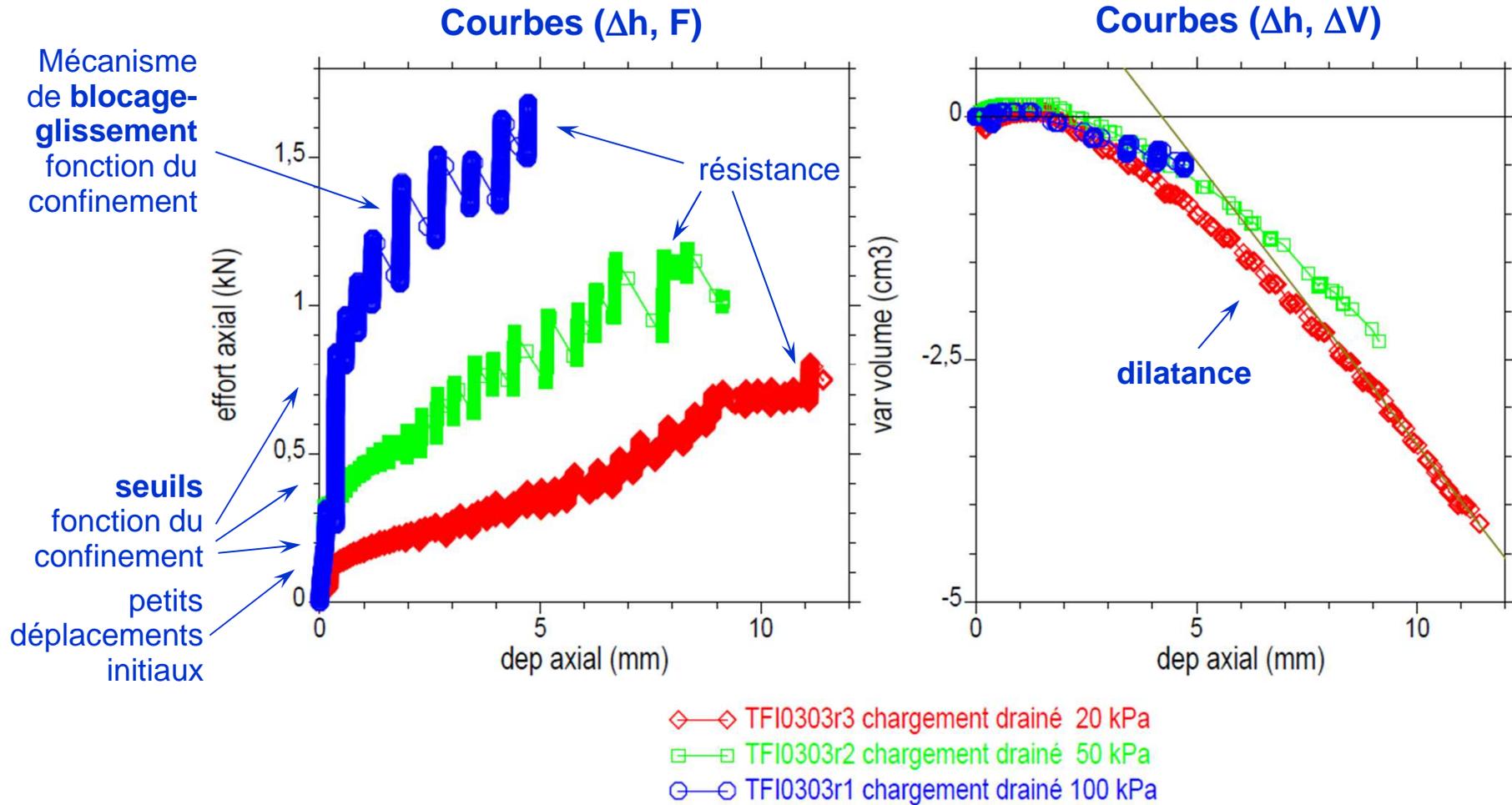
Type La Salle en Beaumont

- Les charges statiques sont maintenues (le confinement et les cisaillements)
- La pression d'eau u est augmentée progressivement jusqu'à la rupture le long de la discontinuité

Le chargement est réalisé en injectant de l'eau dans la discontinuité

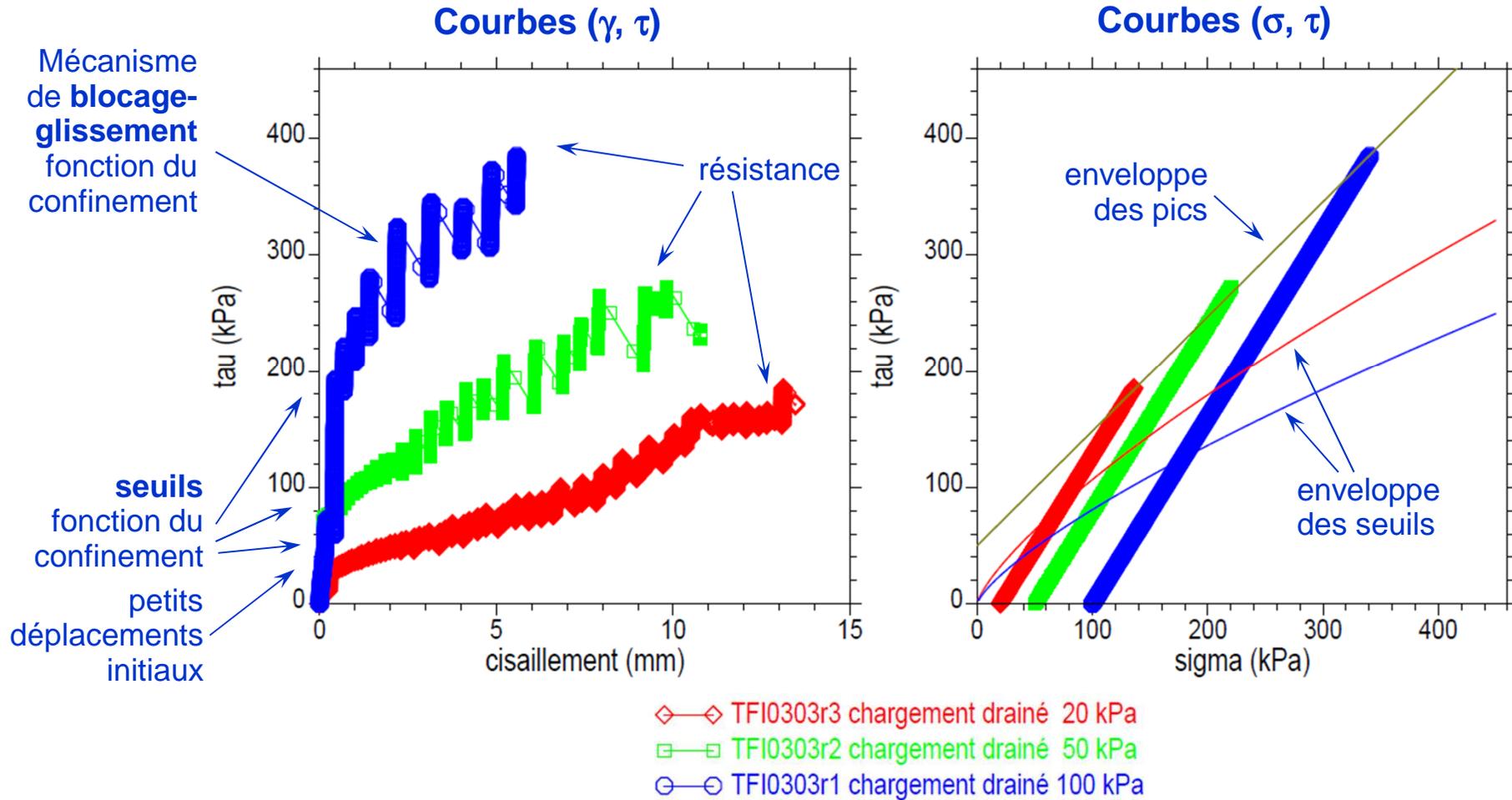
Essais triaxiaux monotones CD

✓ Effet du confinement



Essais triaxiaux monotones CD

✓ Effet du confinement



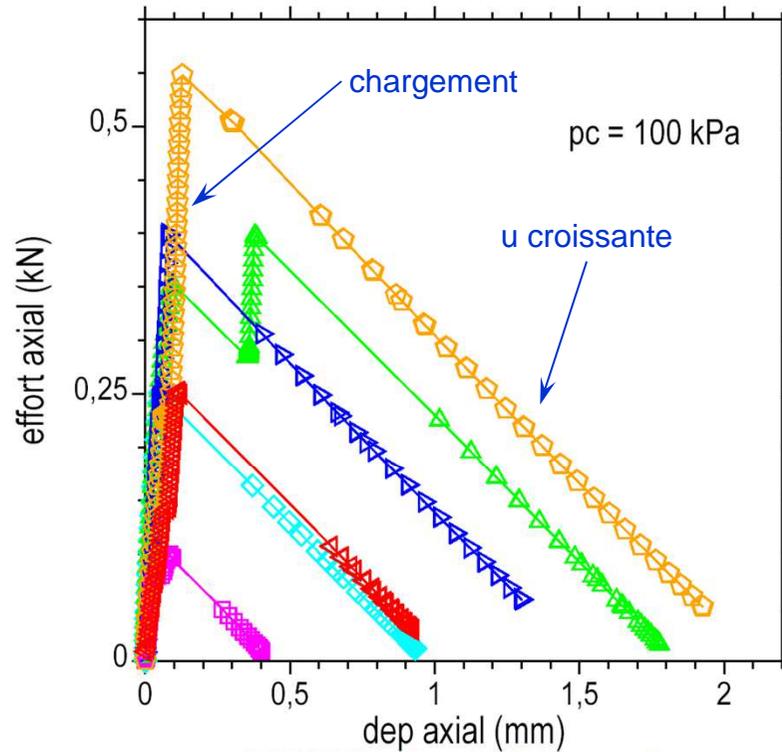
Réponses observées

- ✓ **Essais triaxiaux monotones CD et CU**
 - Un seuil en-dessous duquel le cisaillement est quasi bloqué
 - Ce seuil entre dans l'intervalle des deux paraboles du plan (σ', τ)
 - Puis le glissement progresse par blocage-glissement
 - Avec des amplitudes qui dépendent du confinement et un accroissement continu de l'effort de cisaillement
 - Les mesures de la pression interstitielle témoignent de ces à-coups
 - Avec des pics qui augmentent avec la contre-pression (réactivité en lien avec la compressibilité de l'eau)
 - Une forte dilatance se mobilise dans ce domaine
 - Les chargements aboutissent sur l'enveloppe maximale indiquée par les essais triaxiaux CD

Essais triaxiaux à u croissante

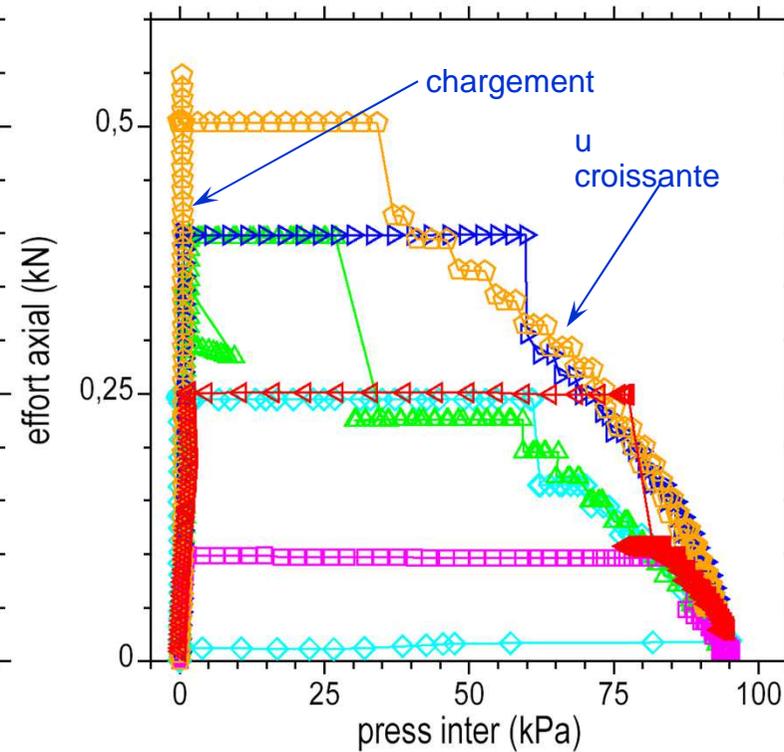
Calcaire blanc $\beta_0 = 58^\circ$ Epontes brutes de sciage

Courbes ($\Delta h, F$)



- ◇—◇ TFI0302r3 $F_o = 0,25$ kN u croissante
- △—△ TFI0302r4 $F_o = 0,47$ kN u croissante
- ▷—▷ TFI0302r5 $F_o = 0,40$ kN u croissante

Courbes (u, F)

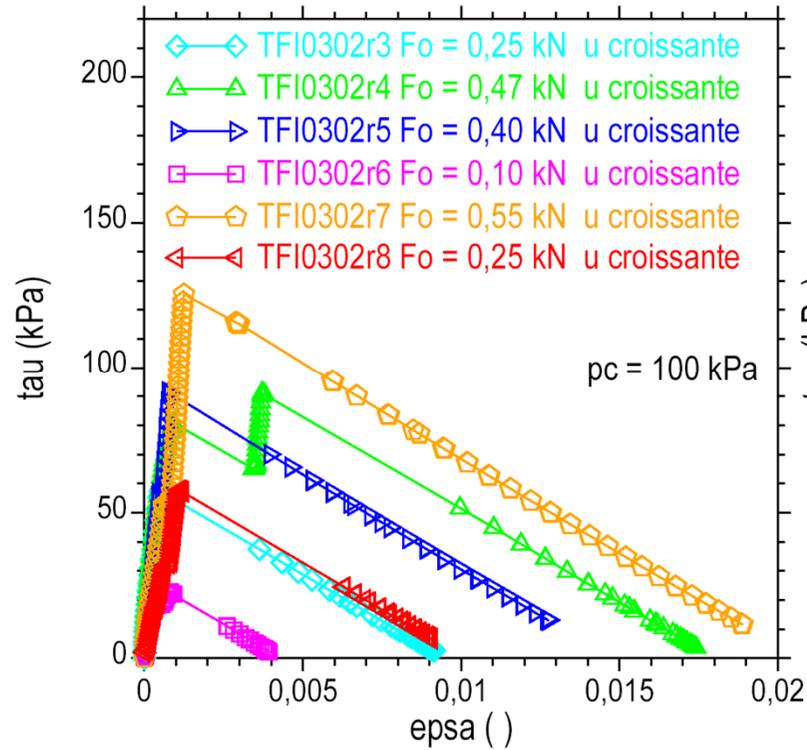


- TFI0302r6 $F_o = 0,10$ kN u croissante
- ◇—◇ TFI0302r7 $F_o = 0,55$ kN u croissante
- ◁—◁ TFI0302r8 $F_o = 0,25$ kN u croissante

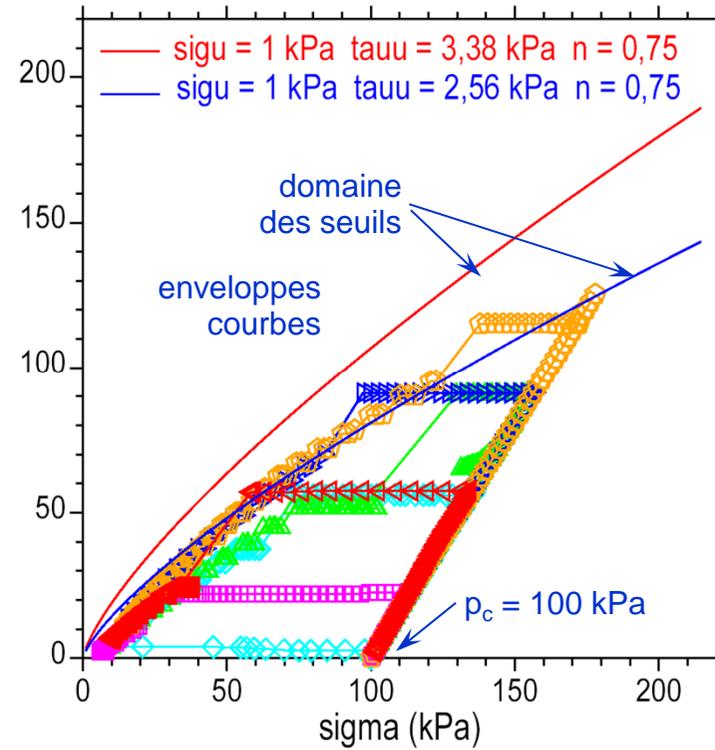
Essais triaxiaux à u croissante

Calcaire blanc $\beta_0 = 58^\circ$ Epontes brutes de sciage

Courbes (ε, τ)



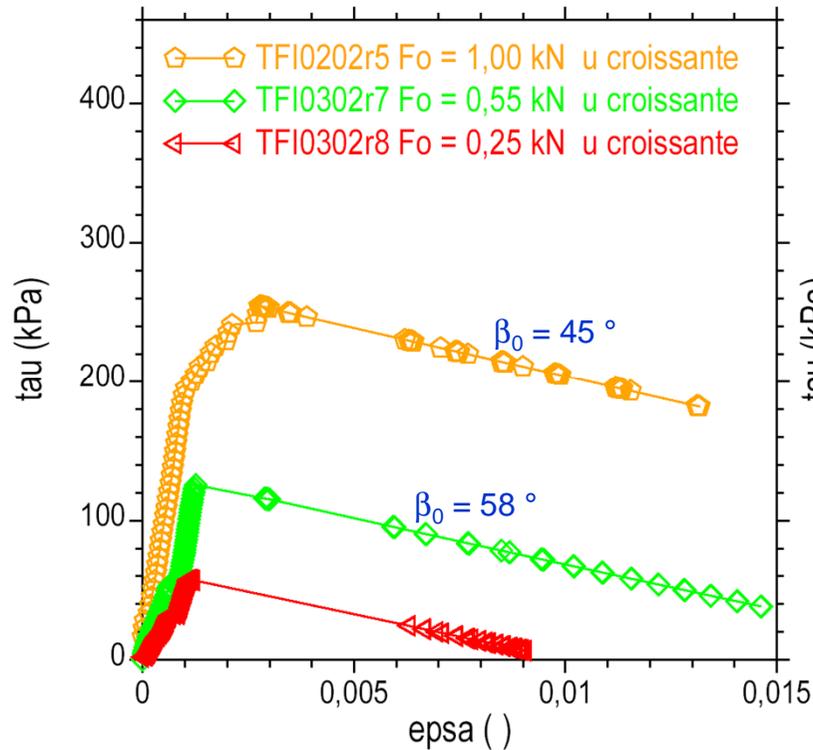
Courbes (σ, τ)



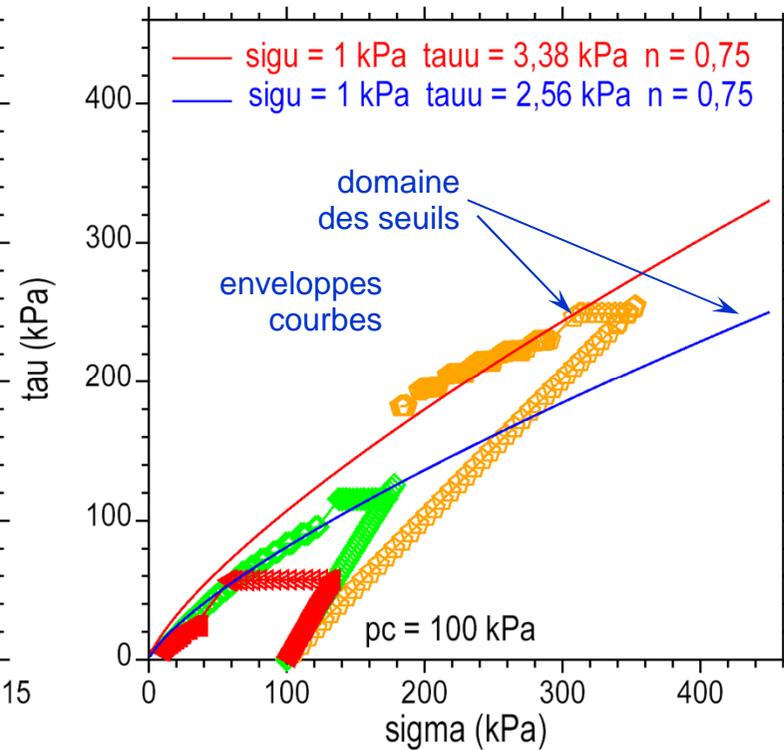
Essais triaxiaux à u croissante

Calcaire blanc $\beta_0 = 45$ et 58° Epontes brutes de sciage

Courbes (ε, τ)



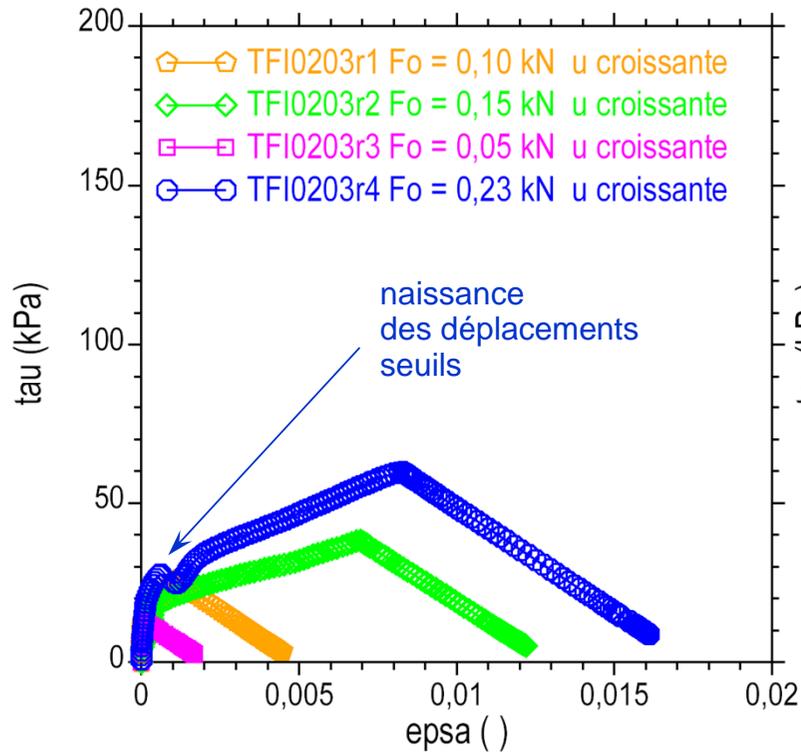
Courbes (σ, τ)



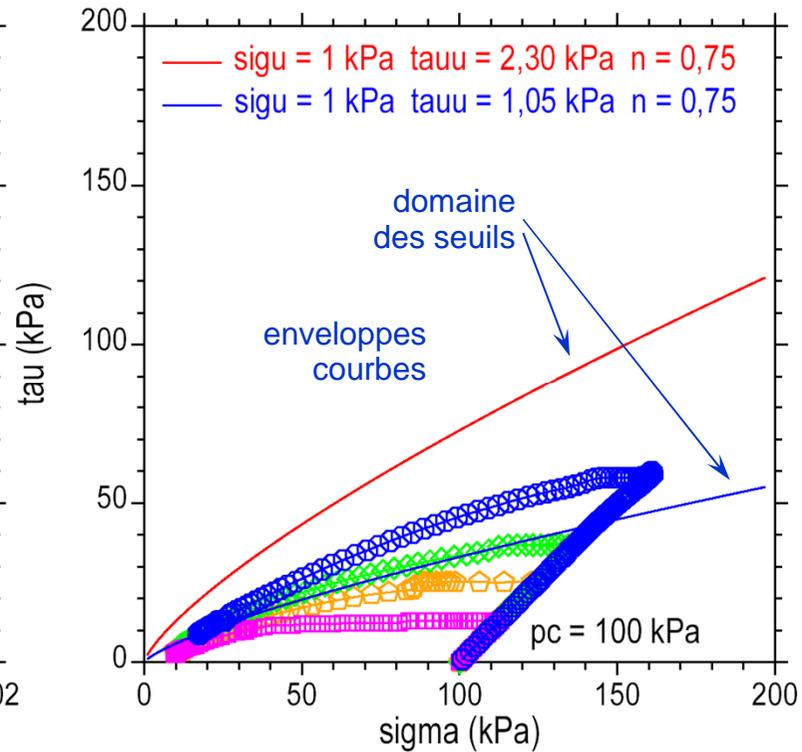
Essais triaxiaux à u croissante

Calcaire blanc $\beta_0 = 45^\circ$ Epontes séparées par deux feuilles de plastique

Courbes (ε, τ)

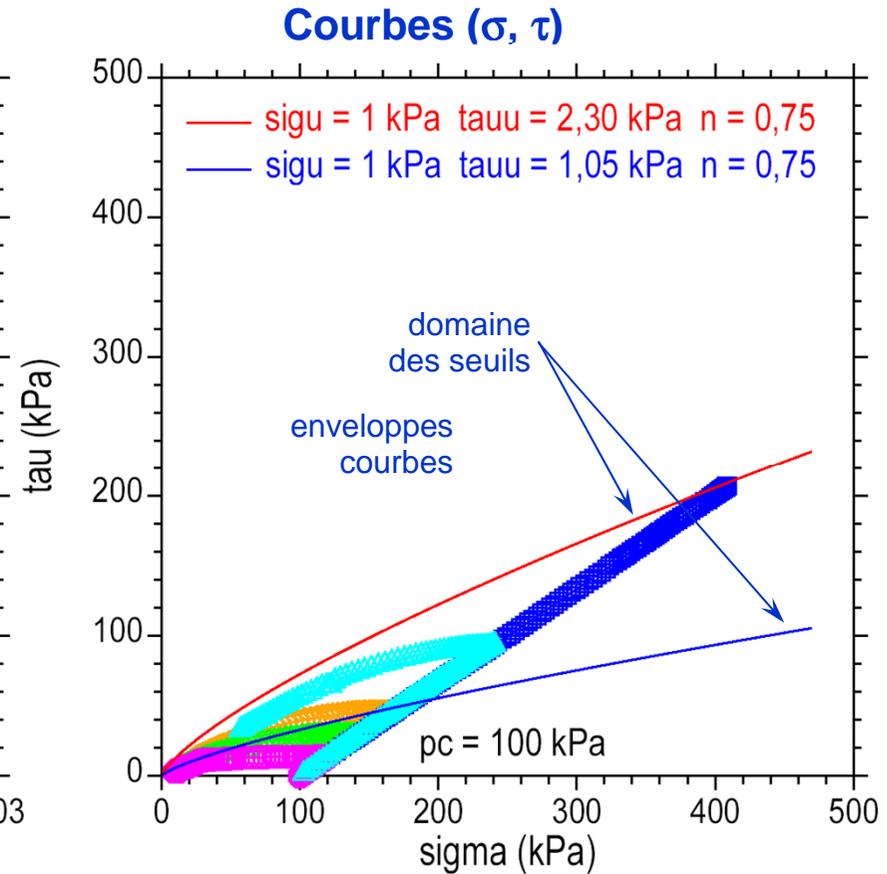
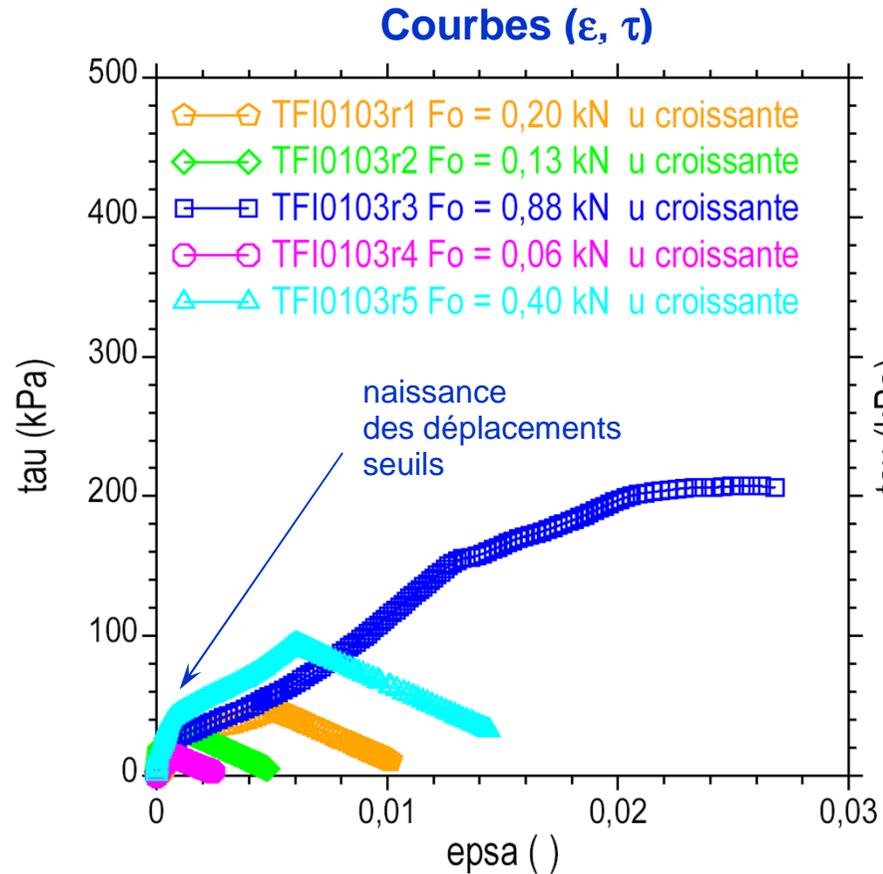


Courbes (σ, τ)



Essais triaxiaux à u croissante

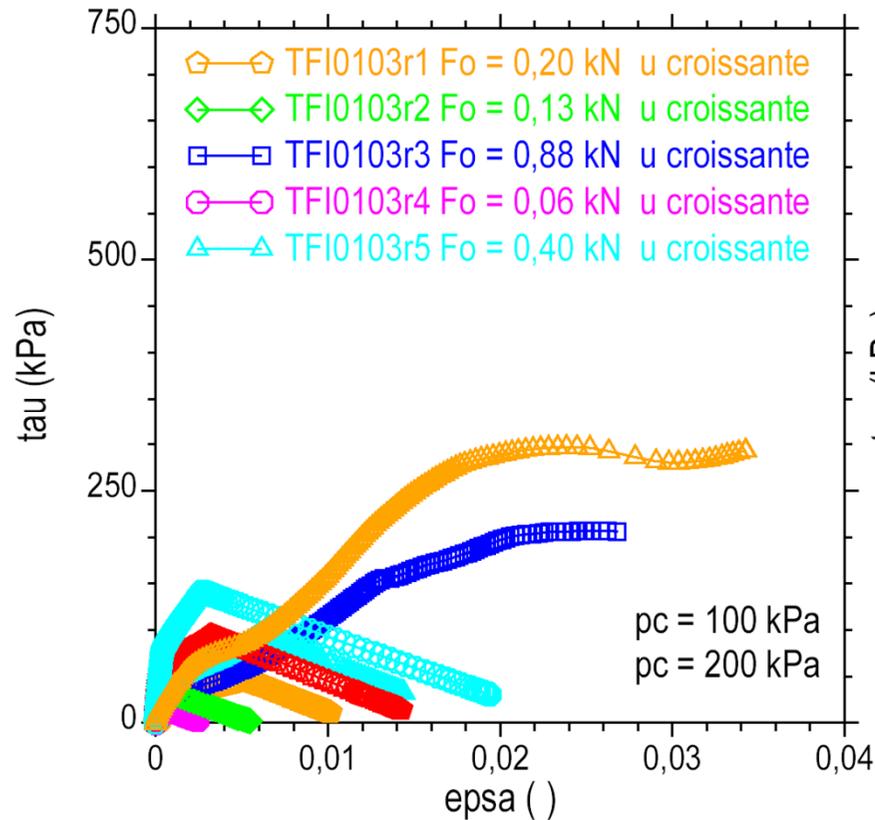
Calcaire blanc $\beta_0 = 34^\circ$ Epontes séparées par deux feuilles de plastique



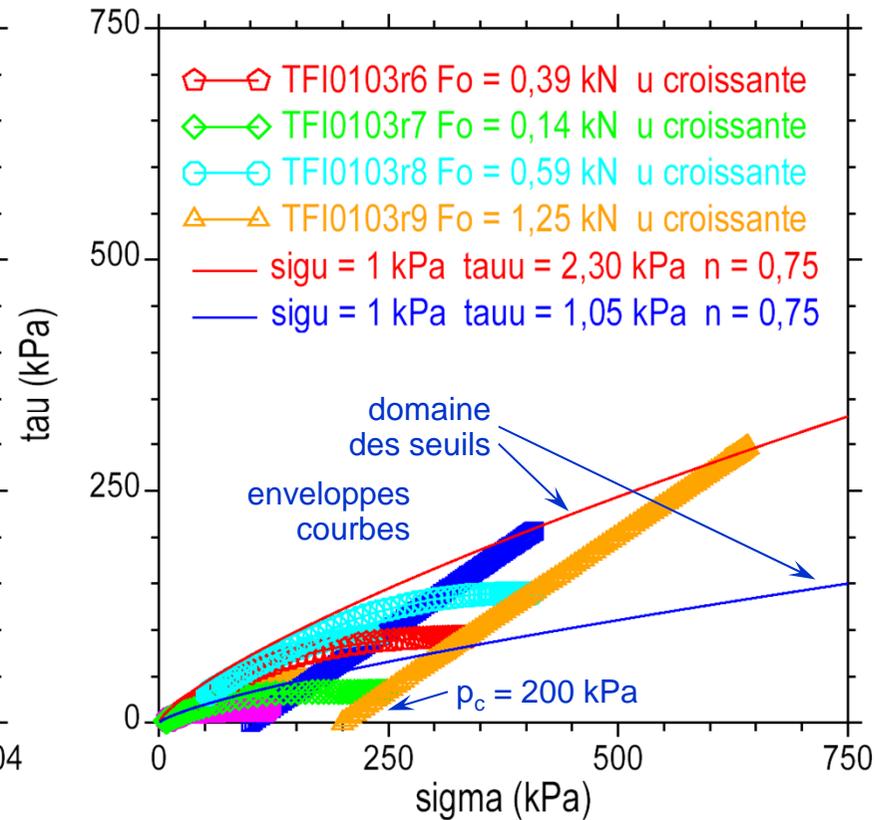
Essais triaxiaux à u croissante

Calcaire blanc $\beta_0 = 34^\circ$ Epontes séparées par deux feuilles de plastique

Courbes (ε, τ)



Courbes (σ, τ)



Réponses observées

✓ Essais triaxiaux à u croissante

- Un seuil de pression u en-dessous duquel le cisaillement est quasi bloqué
- Le cisaillement se manifeste alors par des sauts successifs dans un mécanisme de blocage-glisement
- Les chemins des contraintes effectives (σ' , τ) sont courbes et décroissants
- Ils sont encadrés par deux arcs de parabole d'exposant 0,75
- Ils aboutissent à l'origine du plan (σ' , τ) en relation avec l'angle β_0
- L'initiation des glissements pendant les chargements monotones en compression tombe dans cet intervalle
- Il n'apparaît pas d'instabilité au cours des différents types de chargements
- L'effet de la dilatance est moins marqué

Réponses observées

✓ Essais triaxiaux monotones et u croissante

- A basse pression, l'enveloppe de rupture est courbe
- Il existe un domaine des seuils dans lequel le cisaillement s'effectue par sauts
- Il ne s'agit pas du déclenchement de la rupture mais les cisaillements sont irréversibles
- La résistance au cisaillement des épontes recouvertes de films de plastique est à peu près égale à la moitié de la résistance des épontes brutes de sciage
- L'effet de la dilatance est annulé
- Le mécanisme de blocage-glissement disparaît
- L'interprétation en (σ, τ) s'impose dans tous les cas

Conclusion

✓ Programme expérimental prospectif

- Essais triaxiaux à faible confinement
- Echantillons pré-découpés (roche dure)
- Divers modes de chargement
 - monotones drainés et non drainés
 - à pression interstitielle croissante

✓ Comportement observé

- Après un seuil, les cisaillements se manifestent par des sauts successifs
- Les chargements sont poussés jusqu'à la rupture
- Mais il n'apparaît pas d'instabilité (rupture progressive)
- L'injection de l'eau dans la discontinuité semble effacer le rôle de la dilatance

Fin

