



Comportement hydromécanique d'une fracture : approche expérimentale et modélisation

S. Gentier

Dans une présentation un peu simpliste...

> **Changement des contraintes (tectonique, exploitation humaine...)**

> **Changement de la pression de fluide dans les fractures (injection/ production de puits, surpressions naturelles...)**

> **Déformation des fractures :**

- modification de la géométrie des vides
- modification de la perméabilité
- et changement de la pression de fluide

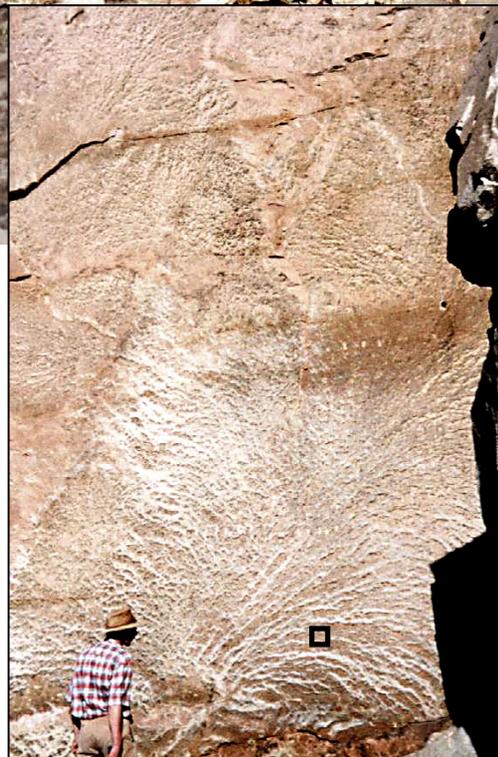
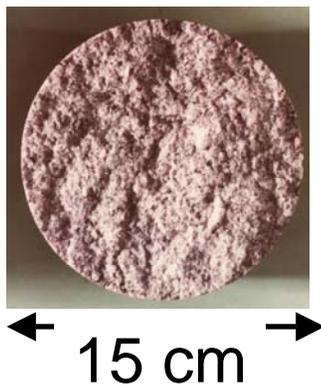
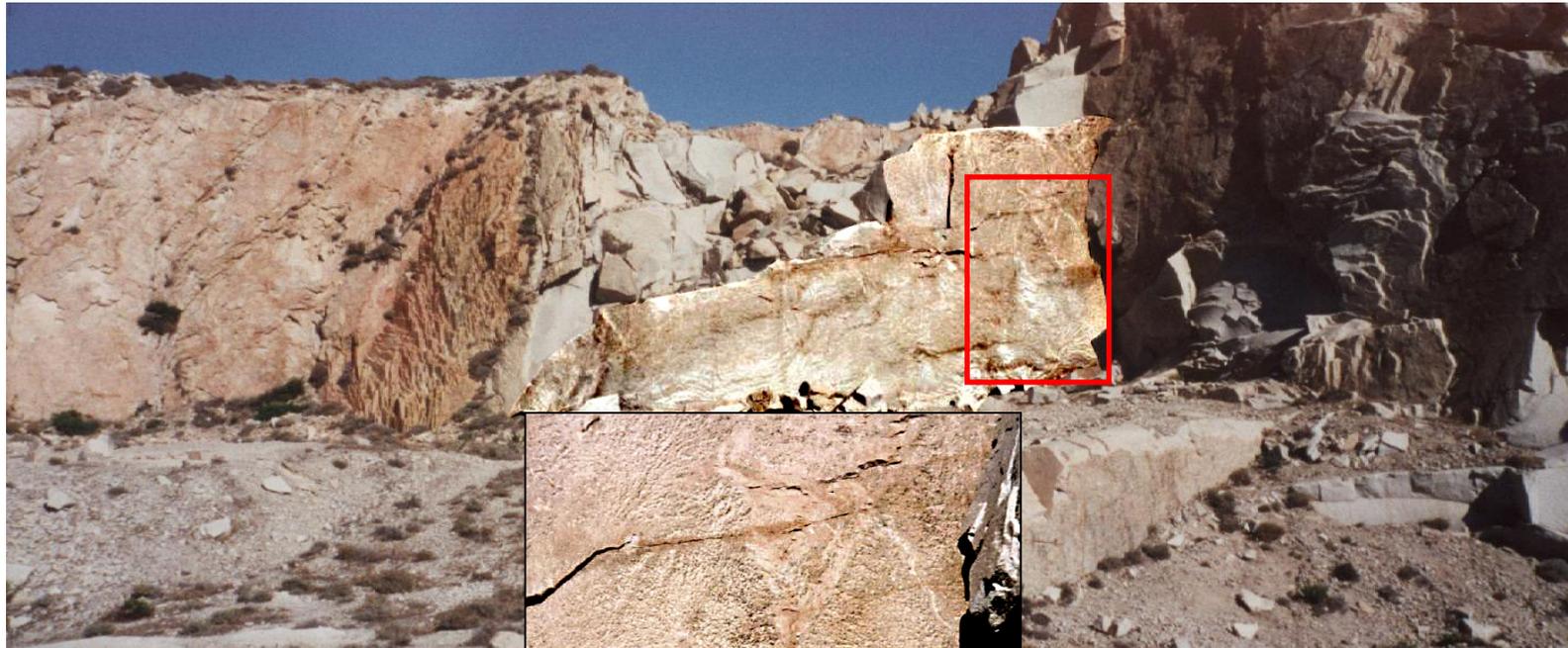
> **Déformation des fractures :**

- changement des contraintes
- modification de la géométrie des vides
- et changement de la perméabilité



Comportement complexe :
accent sur le comportement en cisaillement

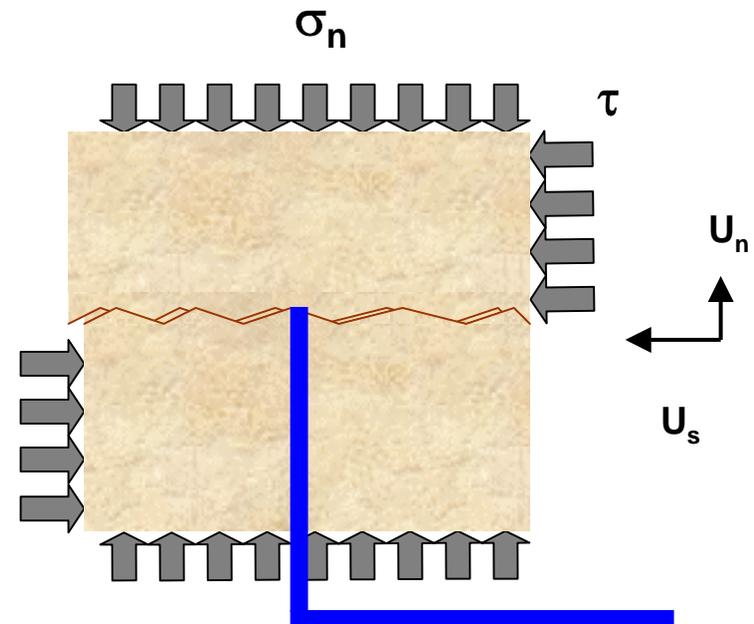
Les objets d'étude : les plans de fracture



Dispositif expérimental



Machine de cisaillement



Principe de l'essai de cisaillement

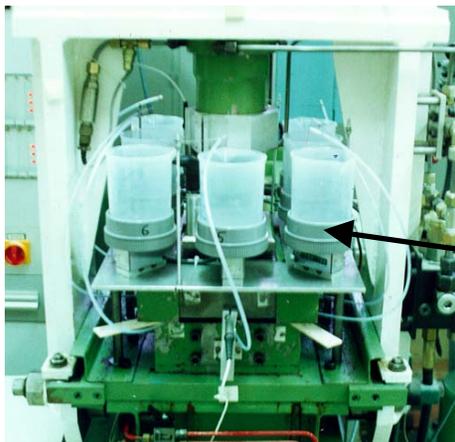
Dispositif expérimental

Boite de cisaillement ouverte



Système de récupération
du fluide par secteur:

- anneau de récupération
- pesée de fluide



Banc d'essai :

- machine de cisaillement
- baie de commande
- rack d'acquisition

Boite de cisaillement fermée

Principe de l'essai

Ce que l'on impose :

Mécanique :

- contrainte normale
- vitesse de cisaillement (0.5 mm/mn)

Hydraulique :

- débit

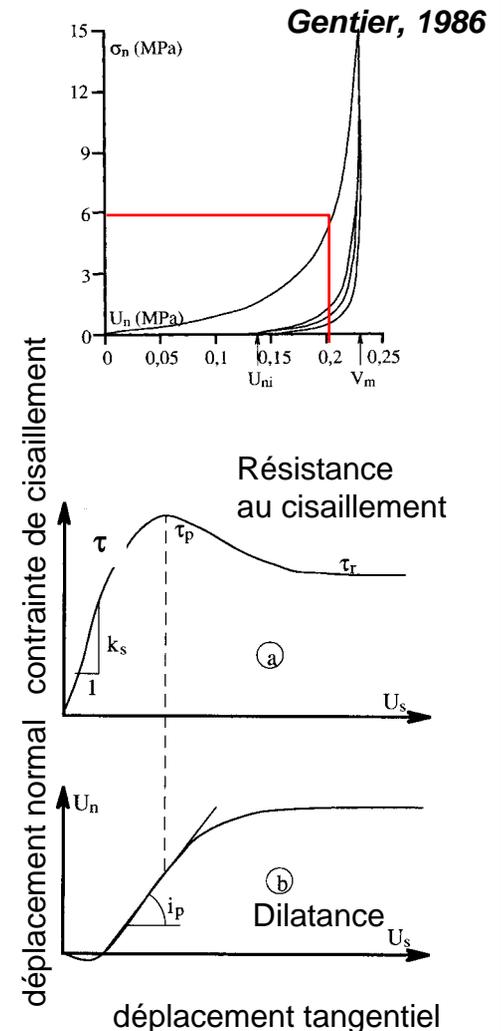
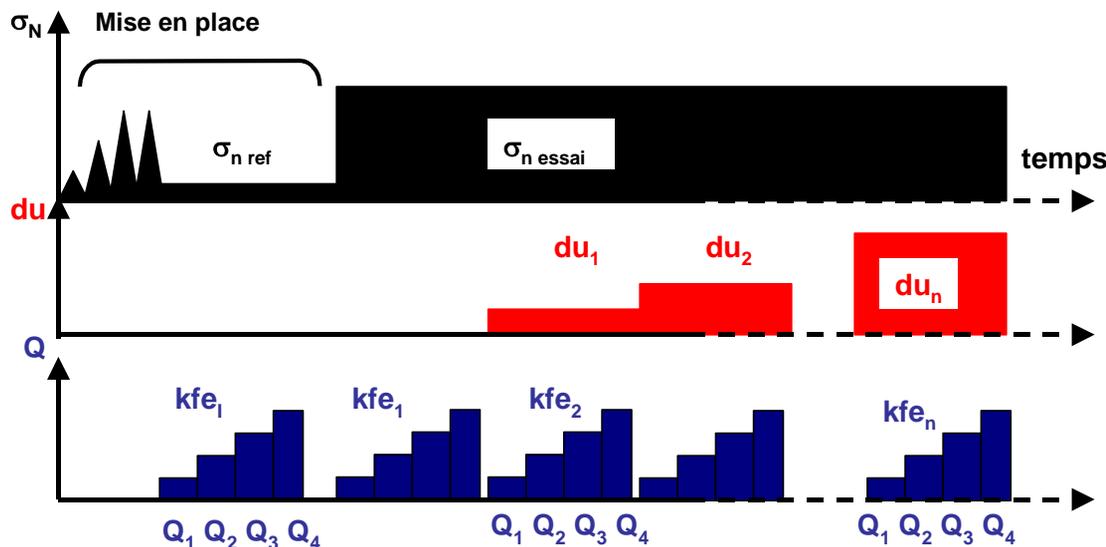
Ce que l'on mesure :

Mécanique :

- déplacement normal
- déplacement tangentiel
- force tangentielle

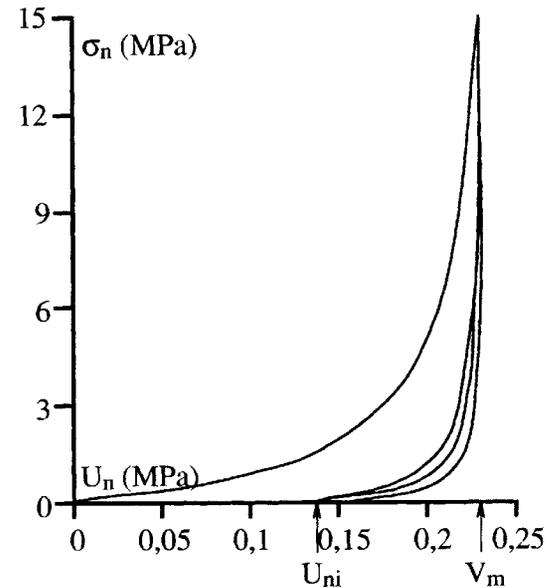
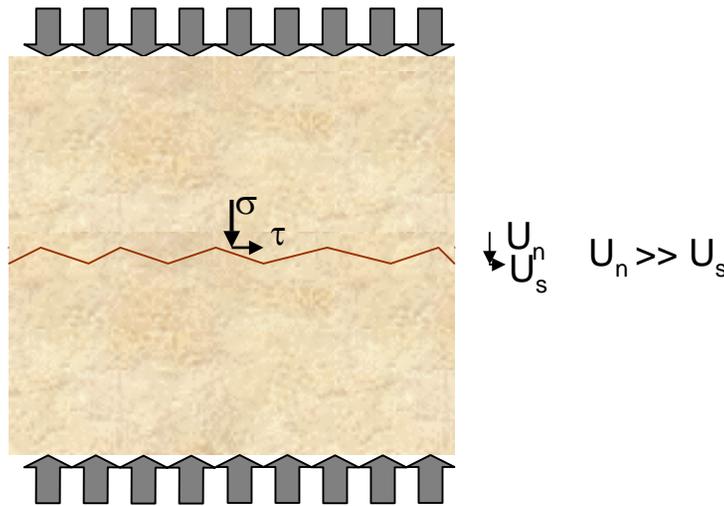
Hydraulique :

- pression d'injection
- poids de fluide par secteur de récupération



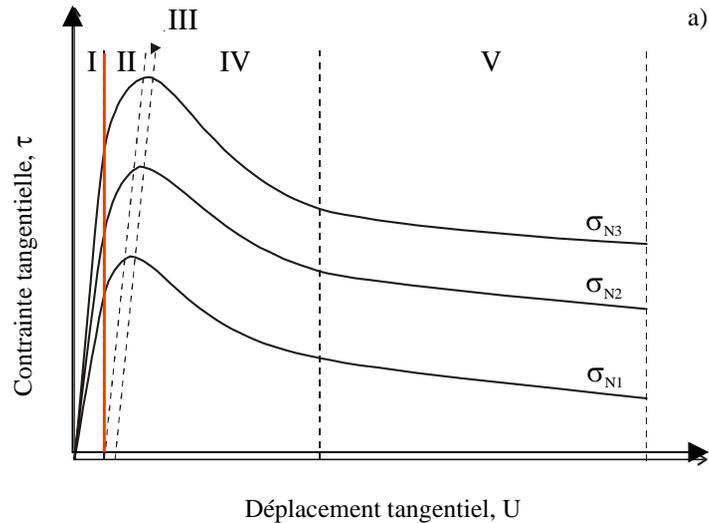
Flamand, 2000

Comportement mécanique sous contrainte normale

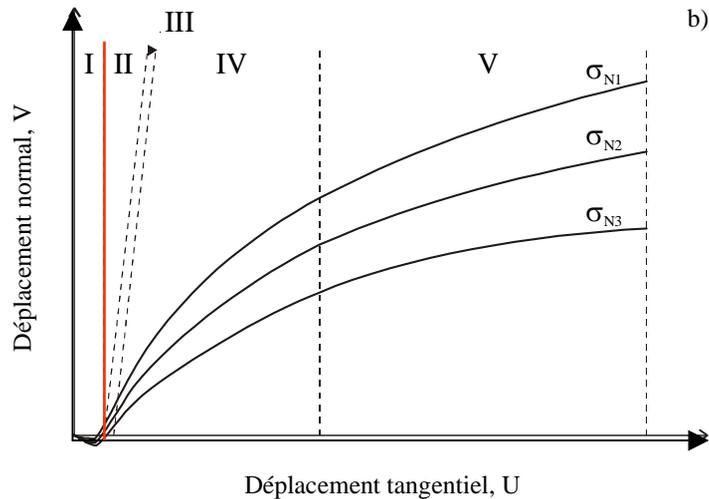


- > **Augmentation rapide de la rigidité K_n quand la contrainte normale augmente**
- > **Atteinte de la rigidité de la roche intacte quand la fermeture maximale est atteinte (ouverture initiale ? ouverture mécanique ?)**
- > **Hystéresis notamment pour le premier cycle de chargement et déchargement. Il décroît avec le nombre de cycles :**
 - mise en place de la fracture
 - plasticité des aspérités pour certains types de roches

Comportement mécanique en cisaillement

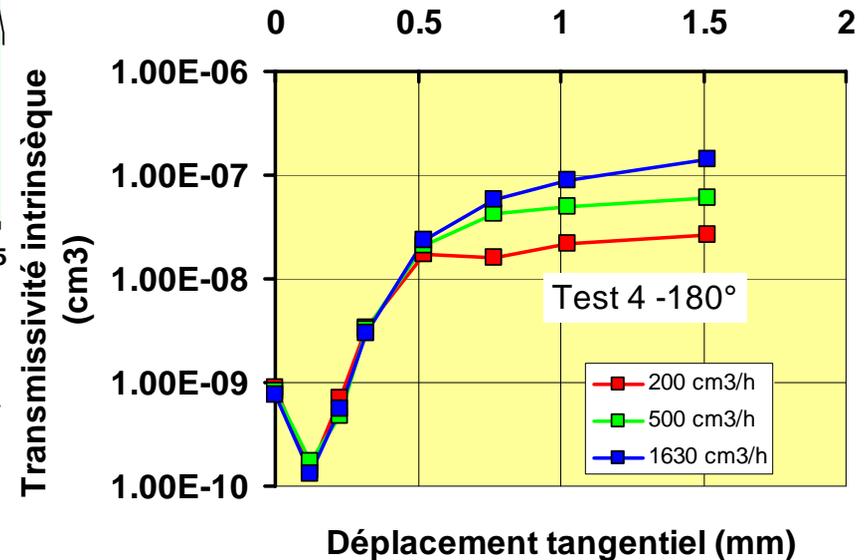
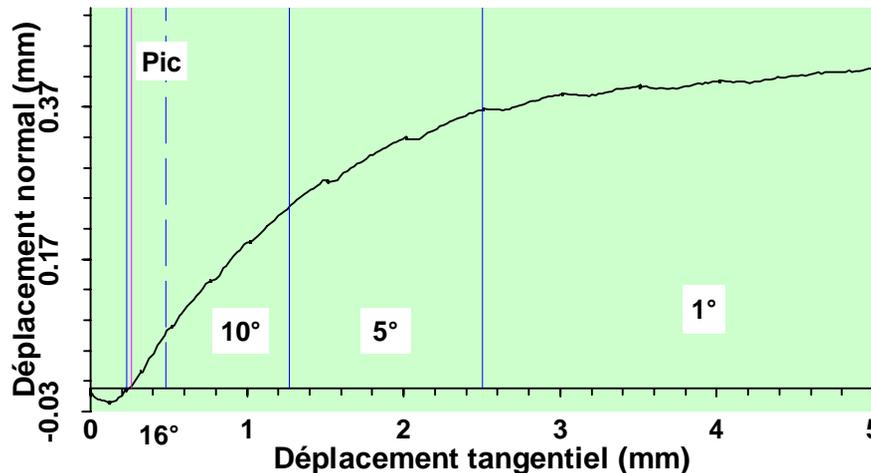
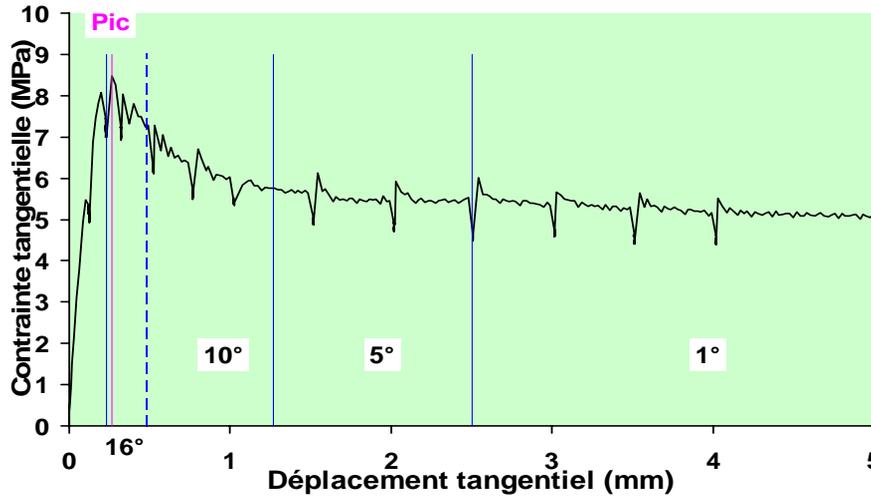


- I : elastic linear phase with increasing of the contact area (contractancy possible)**
- II : non linear phase dilatancy is mobilized with decreasing of the contact area and increasing of the normal stress on contacts**
- III : shear strength peak maximal dilatancy rate with first ruptures**
- IV : softening phase progressive degradation of the asperities inducing an increase of the contact area and a progressive decrease of the dilatancy and a decrease of the normal stress on contacts**
- V : residual phase τ and σ quasi constant large contact area with a low dilatancy (null)**



Relation entre perméabilité et comportement mécanique en cisaillement

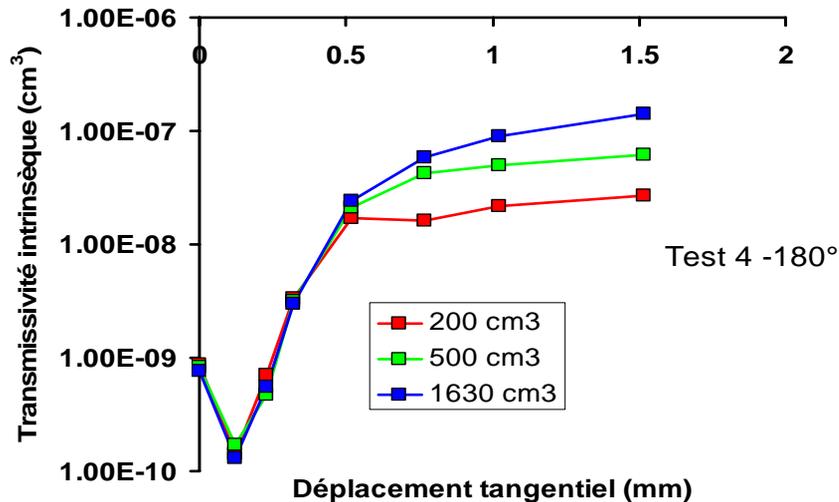
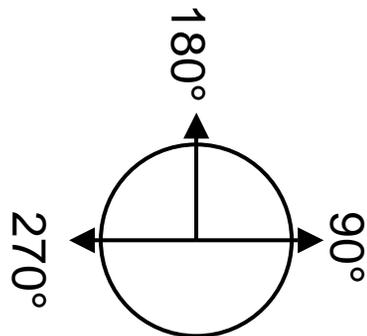
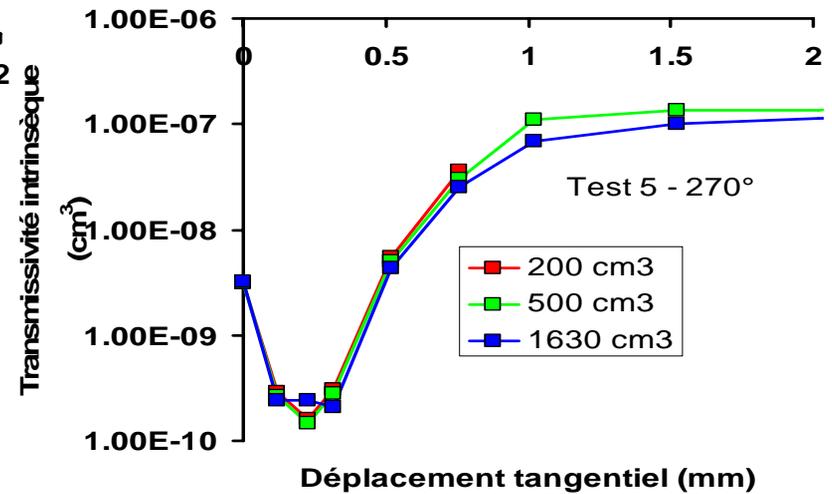
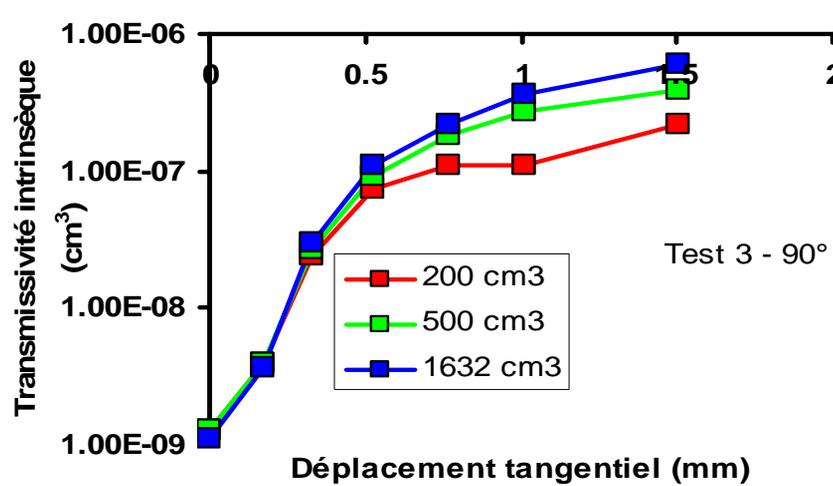
Lamontagne, 2001



Influence de la direction de cisaillement

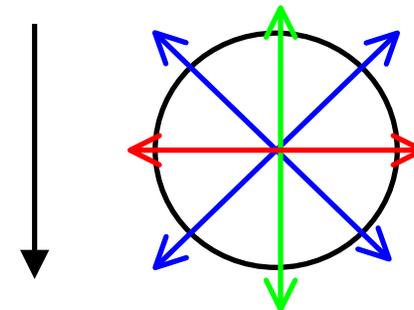
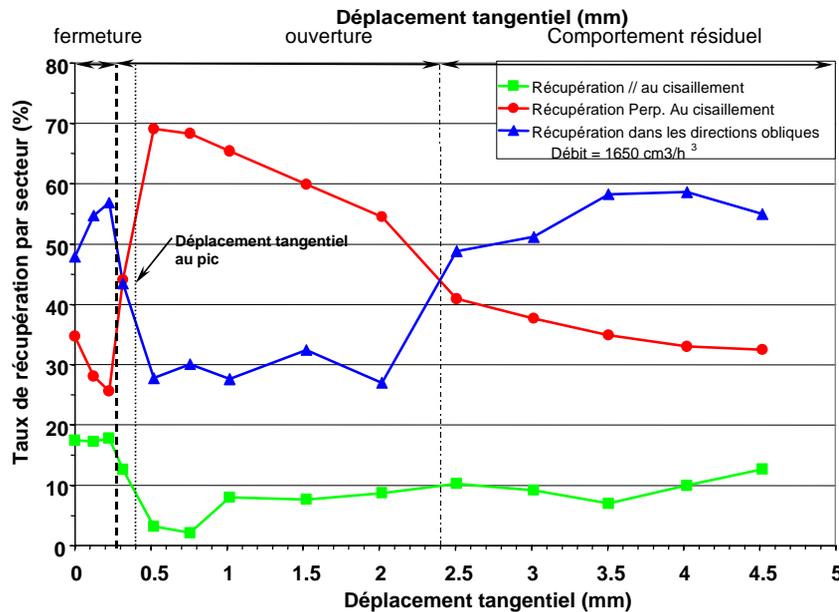
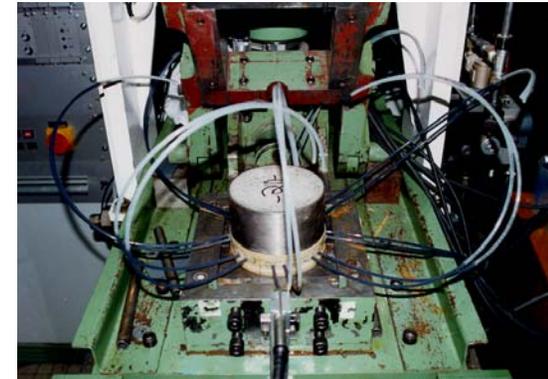
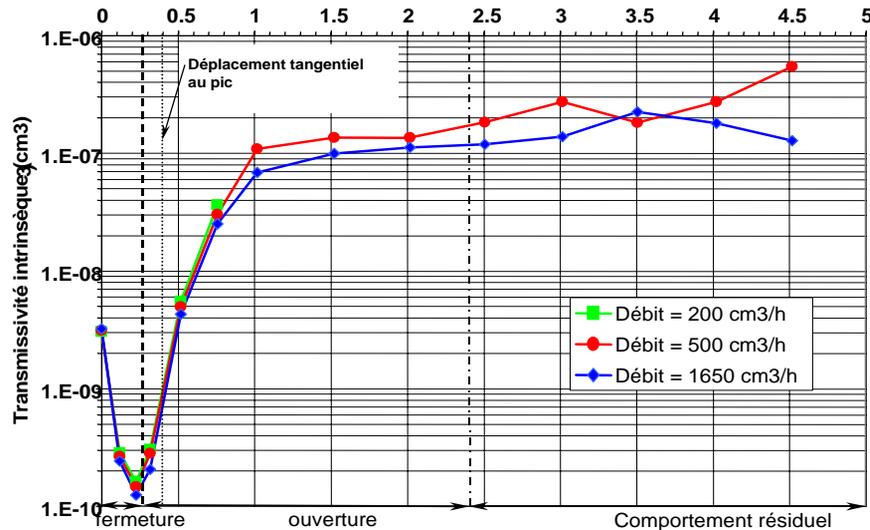
$\sigma_N = 7 \text{ MPa}$

Lamontagne, 2001



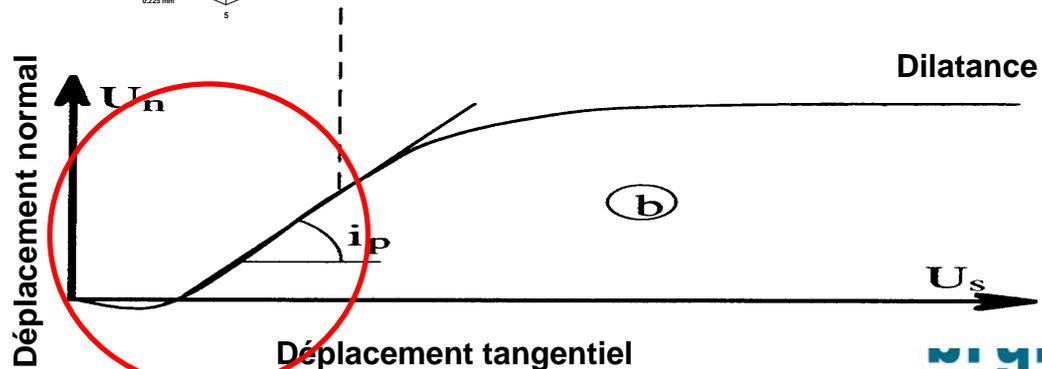
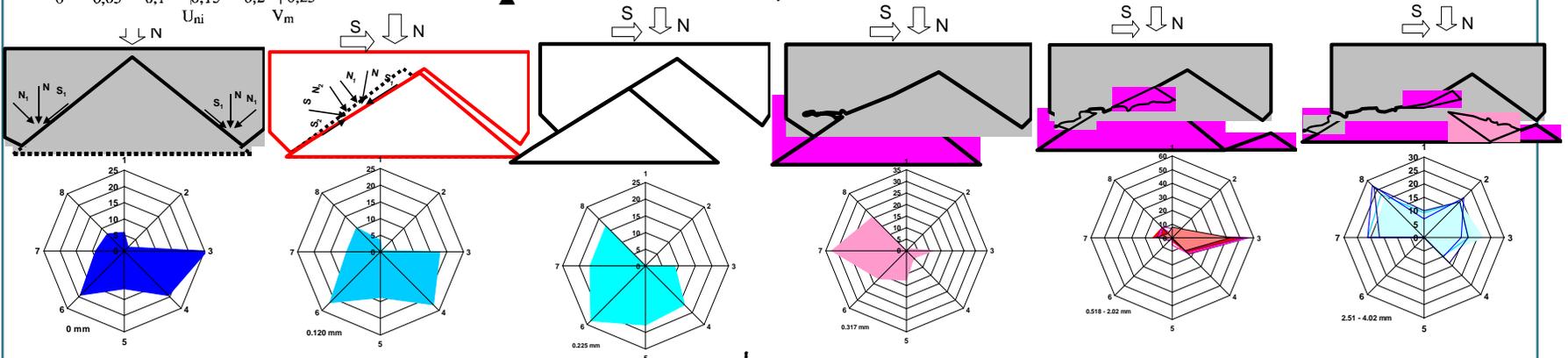
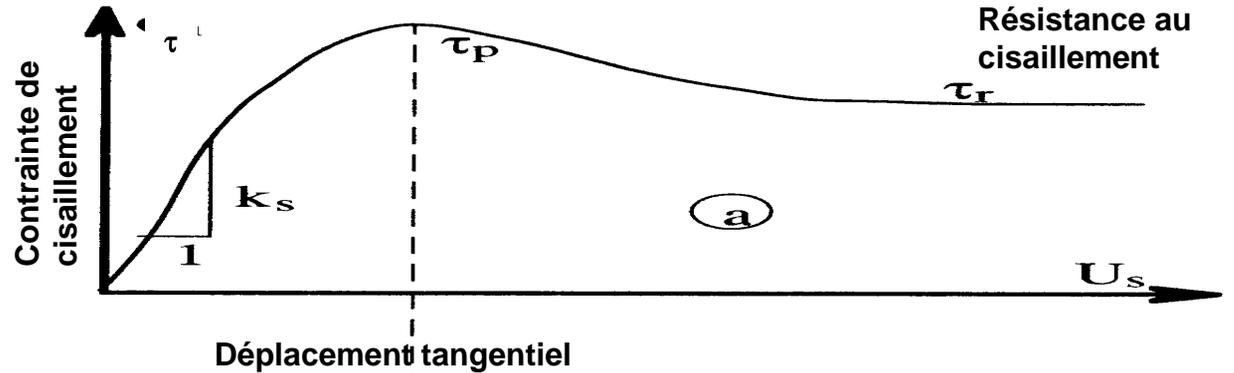
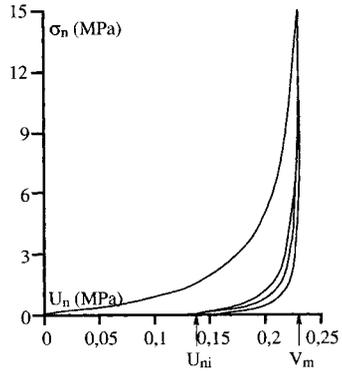
Analyse directionnelle de l'écoulement

Gentier et al., 2000



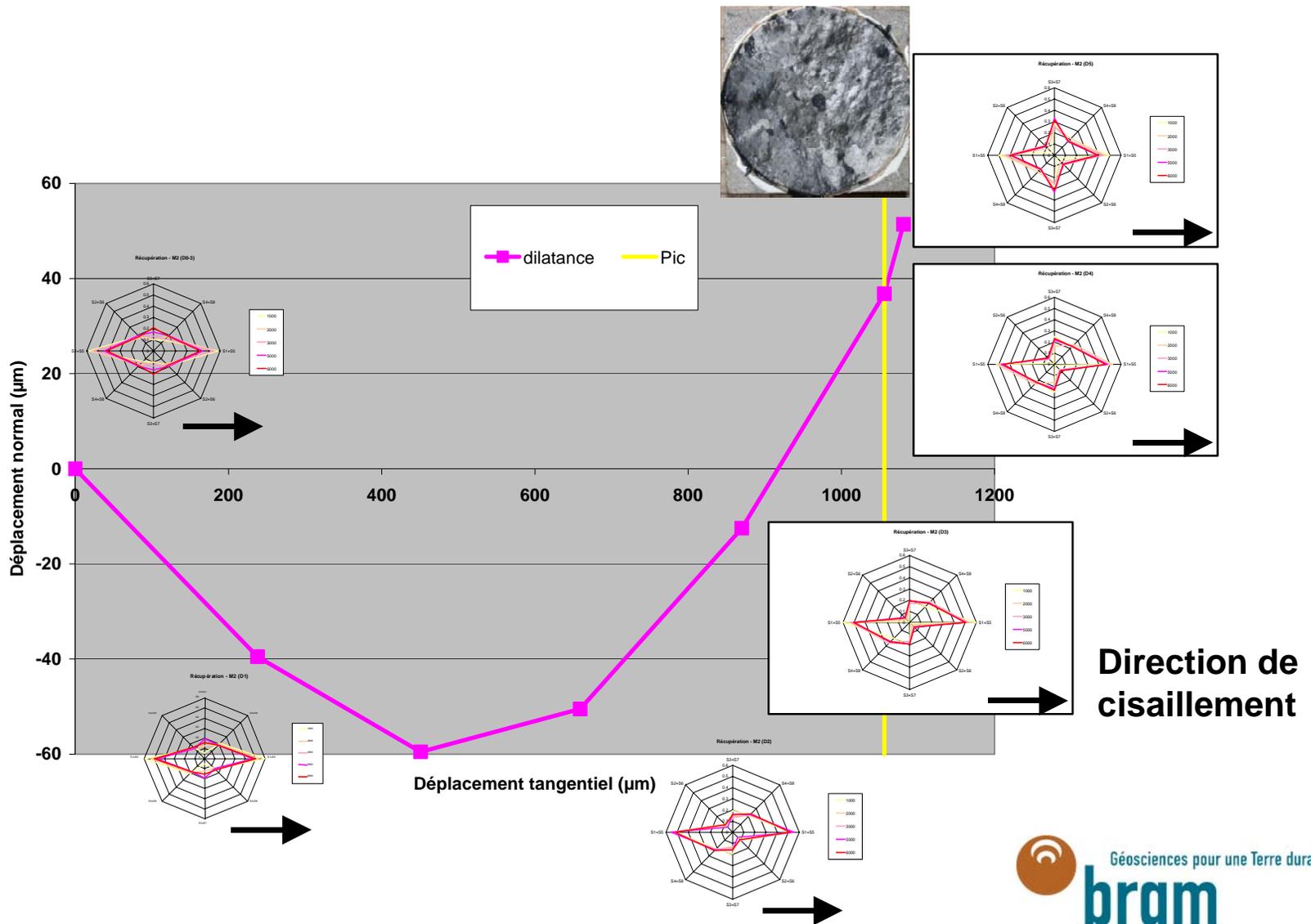
Direction de cisaillement

Perméabilité et phases du comportement mécanique

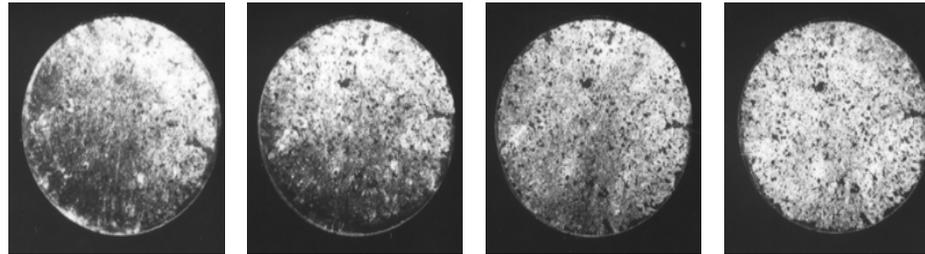


Phase pré-pic : détail

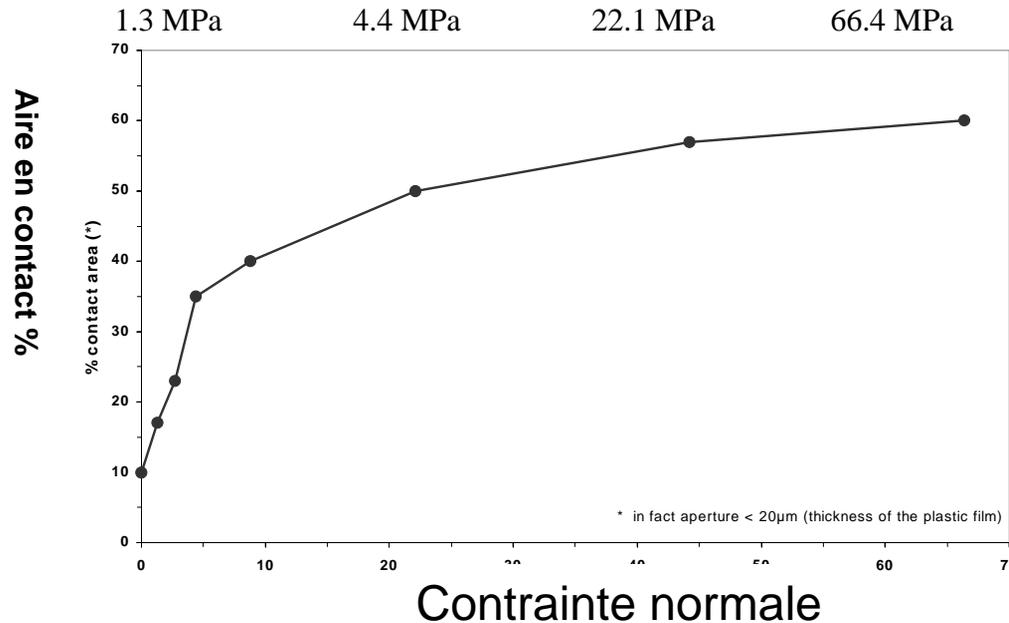
Gentier et Pellegrino, 2003



Comment comprendre l'évolution sous contrainte normale ?



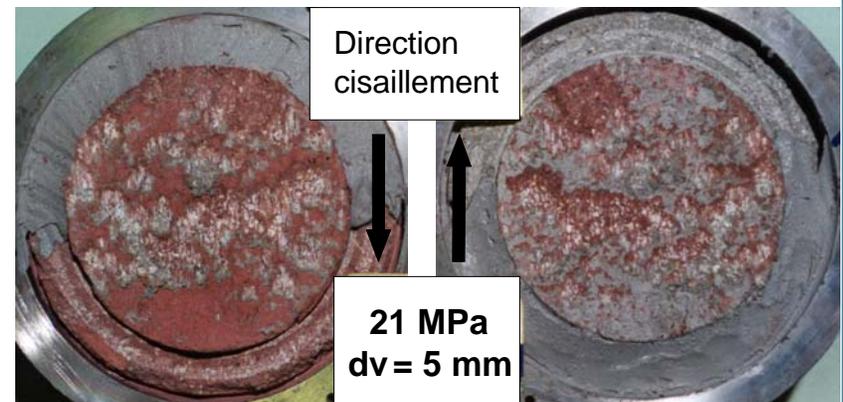
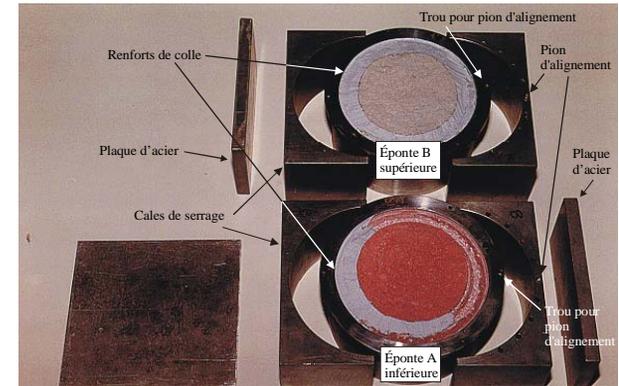
Gentier, 1986



Non linéarité de la fermeture \Rightarrow non linéarité de l'évolution de l'aire en contact

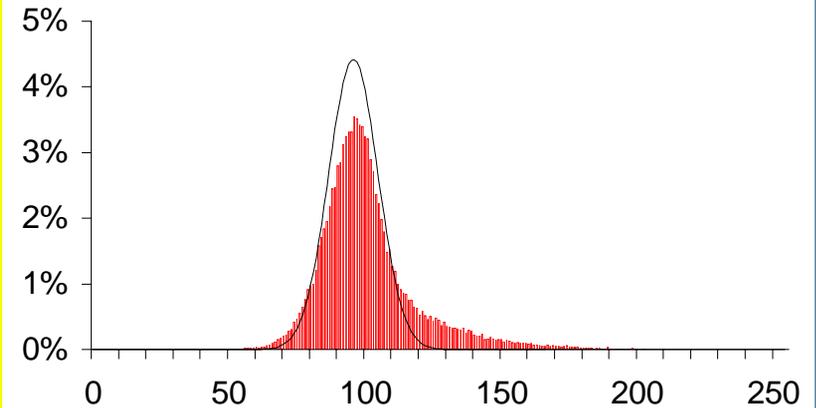
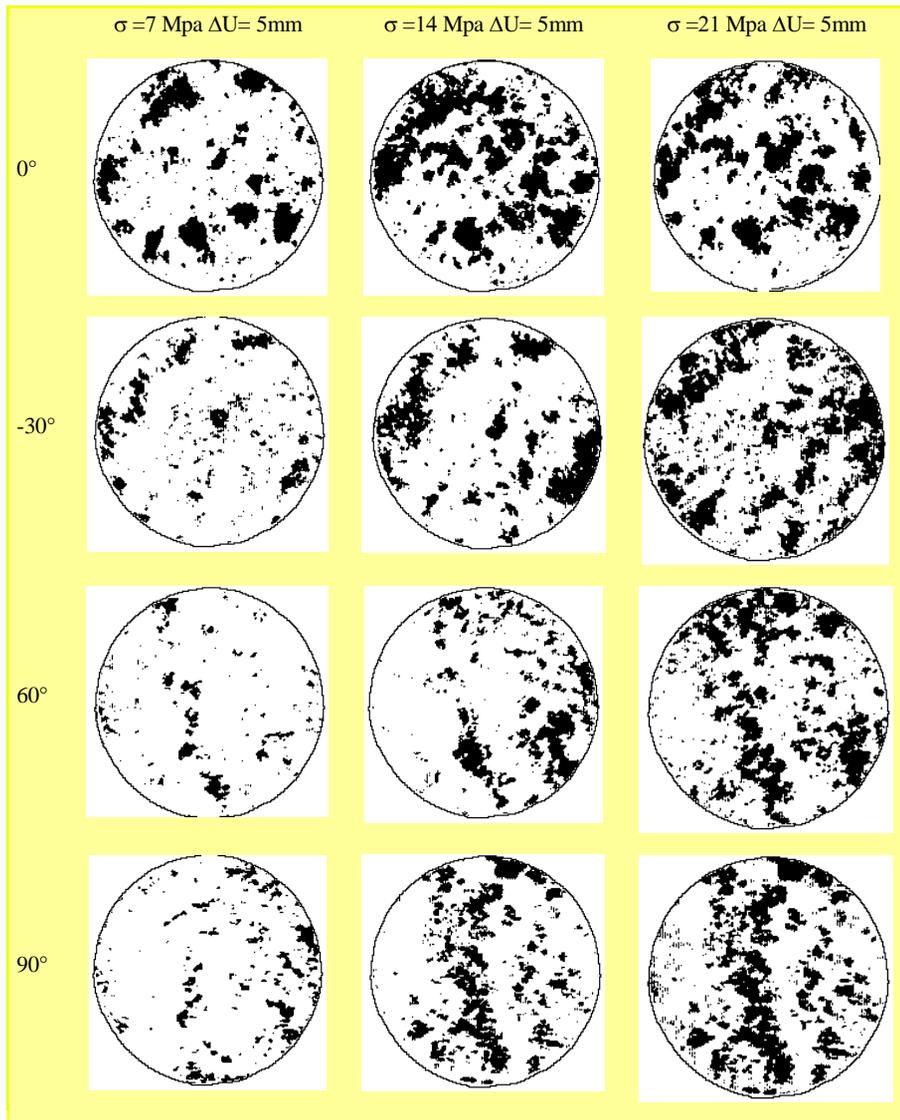
Comment comprendre l'évolution en cisaillement ?

- > Recours à l'analyse des surfaces dégradées et à la modélisation des zones dégradées
- > Moulage des vides en fin de cisaillement



Caractérisation des zones dégradées

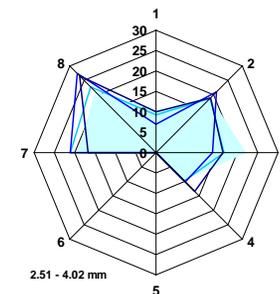
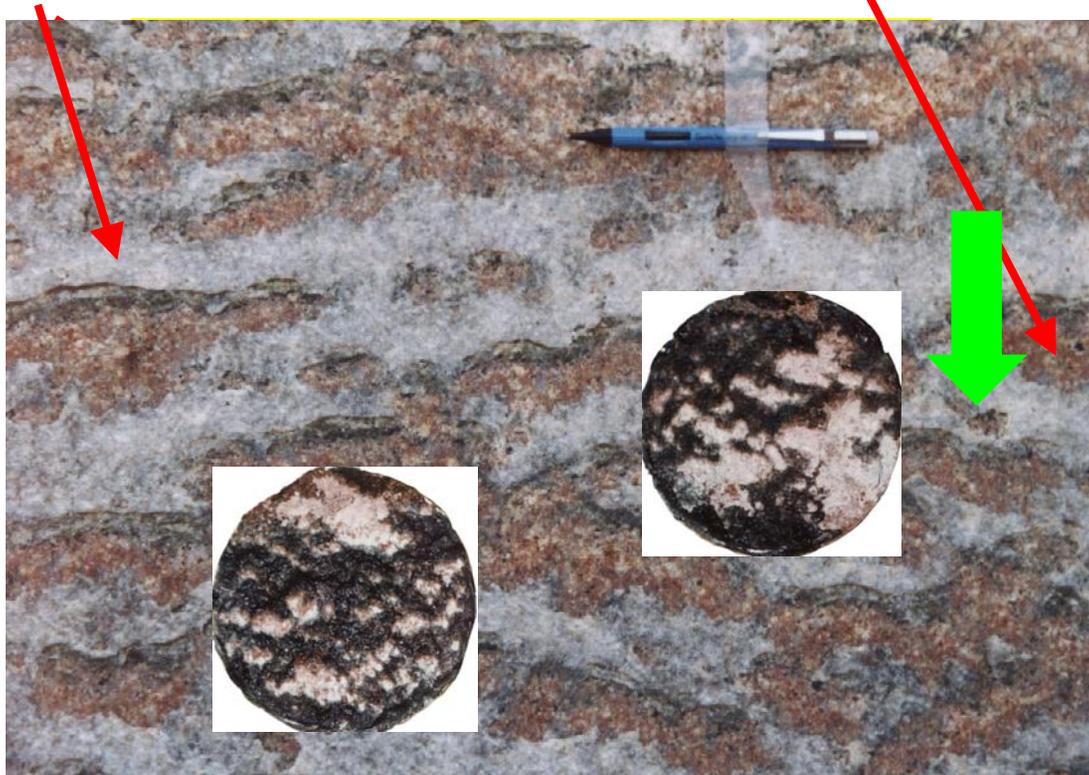
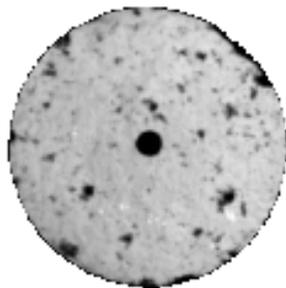
Riss et al., 1997



Géométrie des vides en fin de cisaillement

Vides

Zones endommagées



Expérimentation : conclusions et perspectives principales

Conclusions

- > **Dispositif expérimental (réponse globale et analyse spatiale des écoulements)**
- > **Acquisition de données morphologiques : vides et épontes**
- > **Résultats majeurs:**
 - évolution globale de la transmissivité avec les différents états de contrainte appliqués (normale et cisaillement)
 - rôle de la morphologie de la fracture
 - conséquence sur la répartition des écoulements dans une fracture : géométrie des chemins d'écoulement préférentiel

Perspectives

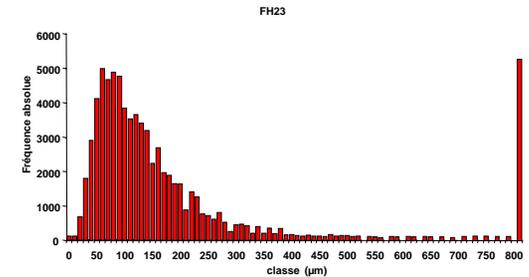
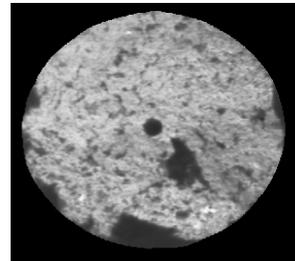
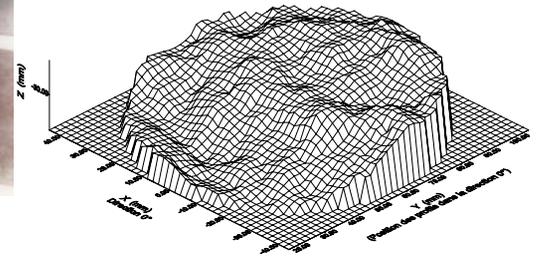
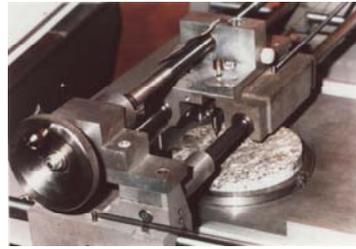
- > **Améliorations (mesures locales de la pression, traçage,...)**
- > **Écoulement parallèle**
- > **Evolution vers des couplages plus complexes (chimie)**
- > **Régimes hydrauliques dans les fractures**
- > **Travaux sur différents types de fracture (généralisation des résultats acquis jusqu'à présent):**
 - fracture striée
 - fracture avec remplissage
 - ...

Modélisation

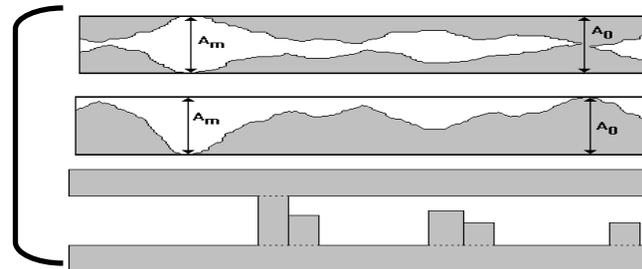
Préalable : modéliser le comportement sous contrainte normale

- mécanique
- hydraulique

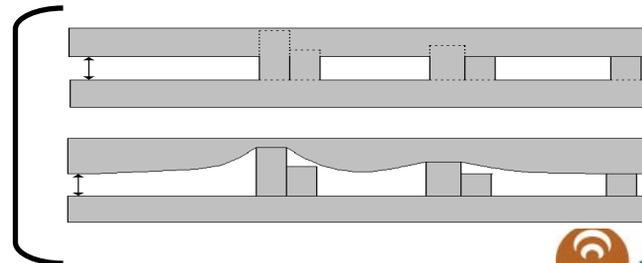
= état initial du cisaillement



Modèle conceptuel d'une fracture

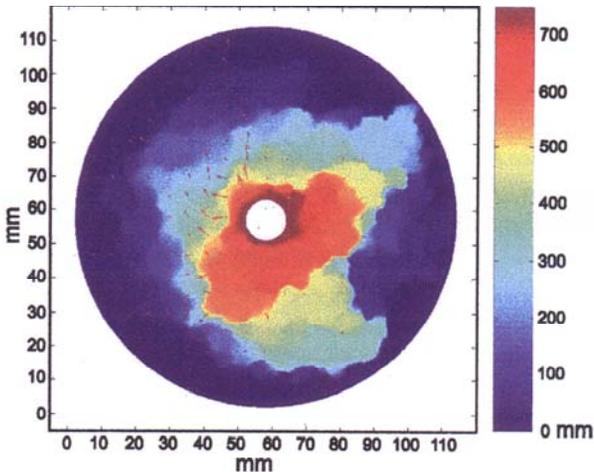
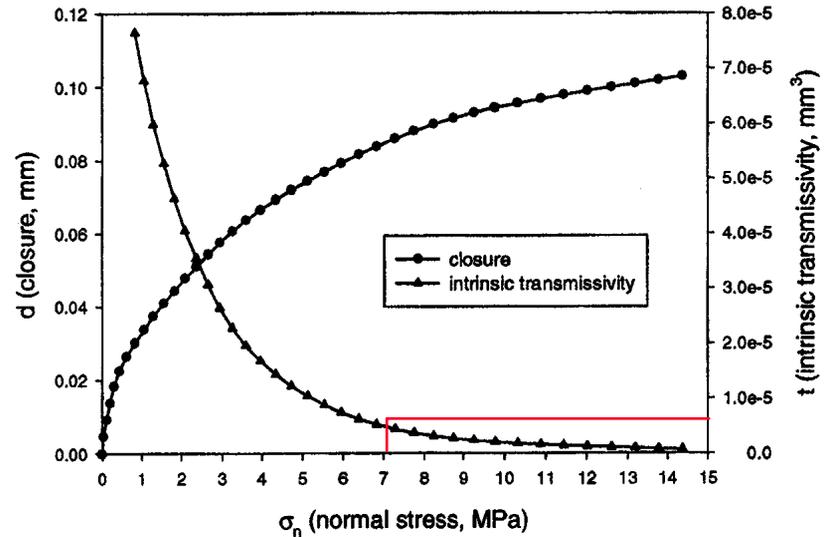
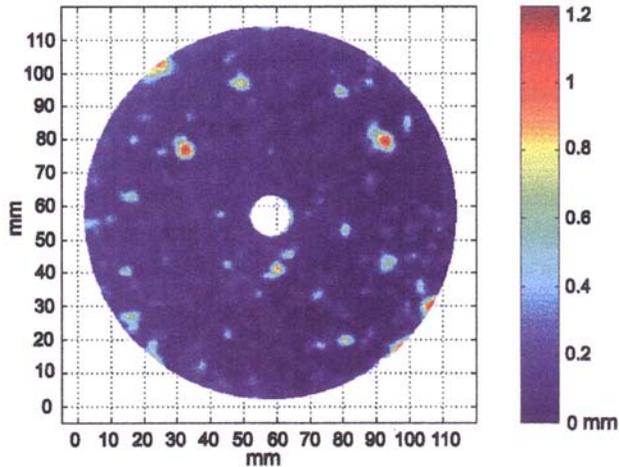


Modèles de déformation

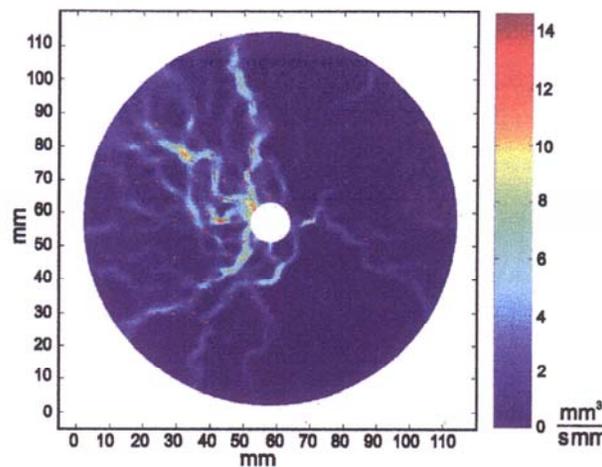


Modélisation hydromécanique : contrainte normale

Capasso et al., 2000



Charges hydrauliques

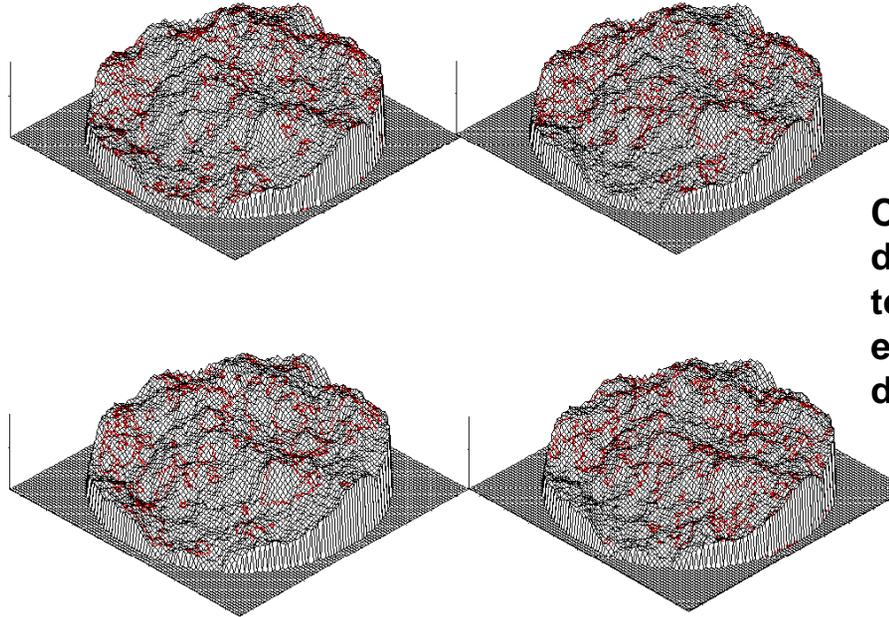


Débits

Evolution de la géométrie
sous contrainte normale
+
équations de Reynolds
(régime laminaire)

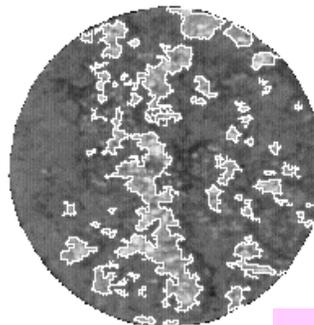
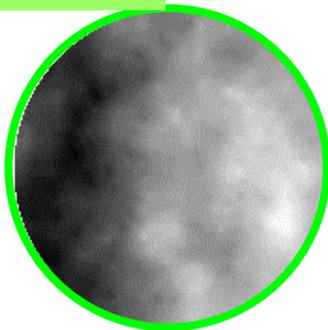
Modélisation hydromécanique en cisaillement : les zones dégradées

Gentier et al., 2000

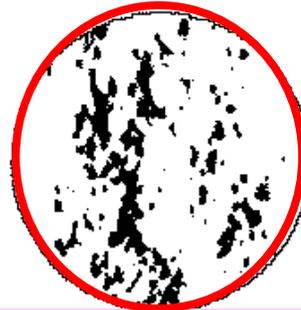


Comparaison des images des dégradations et de la topographie des épontes en fonction de la direction de cisaillement

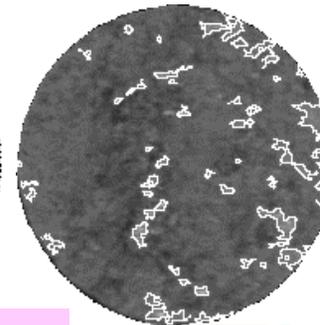
Image de la topographie de l'éponte



$\sigma_N = 14 \text{ MPa}$



Gradient directionnel



$\sigma_N = 7 \text{ MPa}$

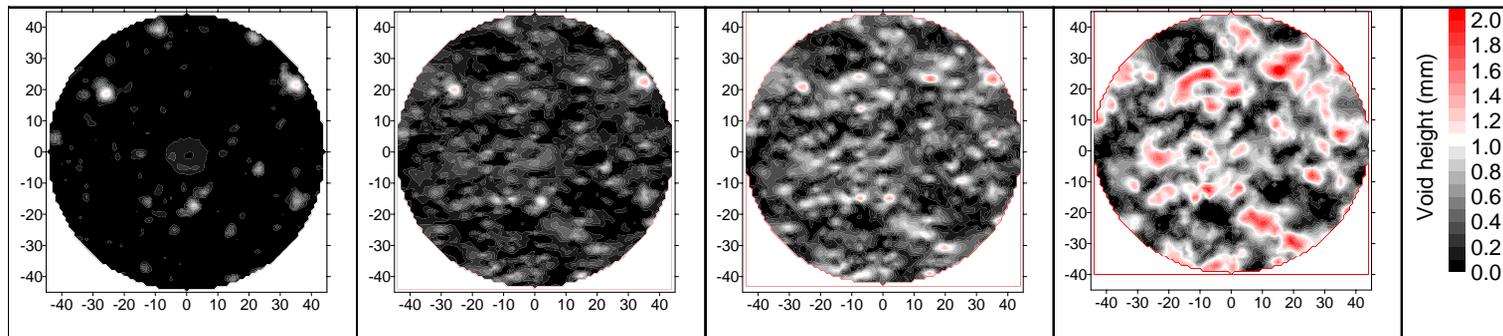
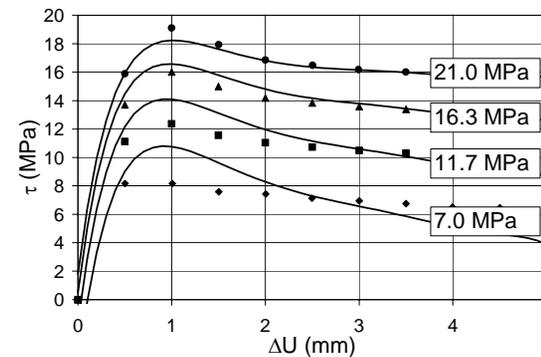
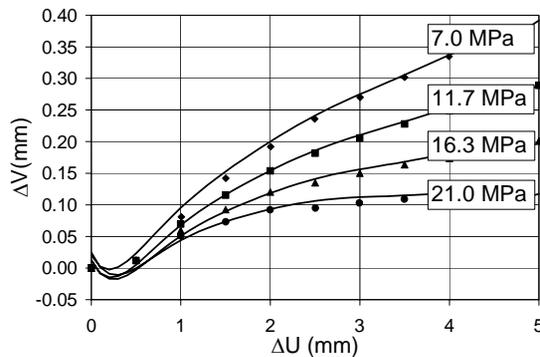
sciences pour une Terre durable



Modélisation hydromécanique en cisaillement

Marache et al., 2002

1. Extension du modèle en contrainte normale : ?
2. Modélisation du comportement au moyen des plans d'expériences



3. Modélisation de l'évolution des vides au cours du cisaillement

Modélisation : conclusions et perspectives principales

Conclusions

- > **Modélisation des épontes ou des vides**
- > **Modélisation des zones dégradées (relation avec la morphologie des épontes)**
- > **Modélisation hydromécanique en contrainte normale :**
 - comportement mécanique (fermeture)
 - distribution des contacts : report des contraintes en liaison avec la déformation des épontes
 - hydraulique : équations de Reynolds semblent acceptables si hypothèse régime laminaire acceptable
- > **Modélisation hydromécanique en cisaillement :**
 - comportement mécanique pas satisfaisant : évolution de la géométrie des vides ?

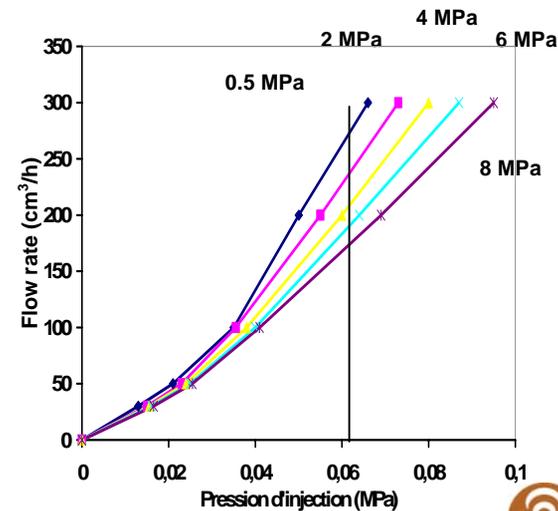
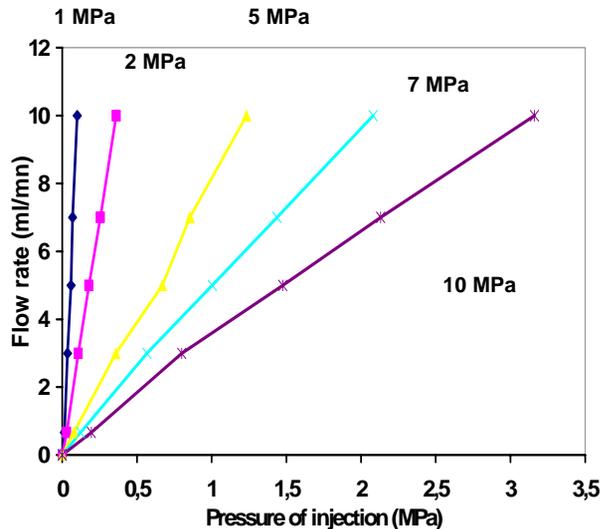
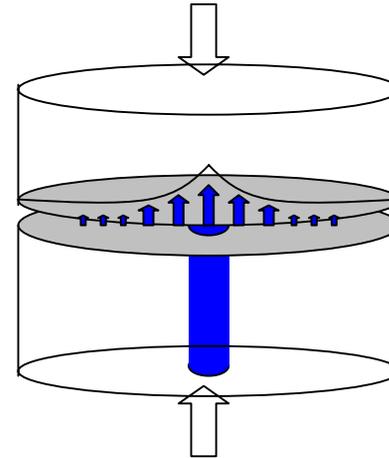
Perspectives

- > **Modélisation des vides et des épontes: application du modèle Chilès et Gentier, 1992**
- > **Intégration dans un modèle de comportement en cisaillement**
- > **Confrontation avec d'autres résultats expérimentaux provenant d'autres fractures**
- > **Amélioration du modèle mécanique :**
 - modèle de Marache (2002)
 - plans d'expérience

Vers un couplage hydromécanique complet

> Jusqu'à présent :

- effet de la pression de fluide est considérée comme négligeable
- hydraulique : régime laminaire

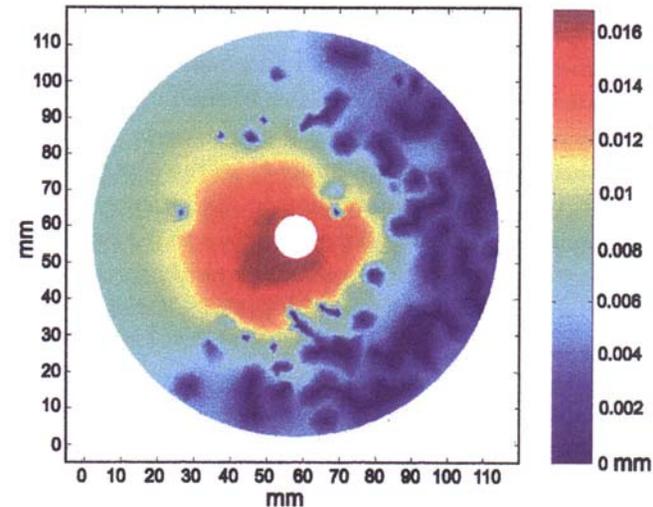
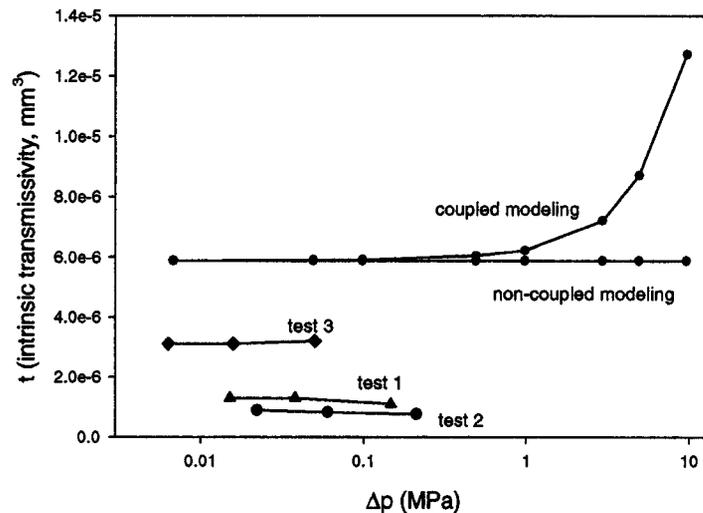


Gentier et al., 1995, 1996

Modélisation hydromécanique réellement couplée

Capasso et al., 2000

Augmentation de la transmissivité
quand la pression augmente

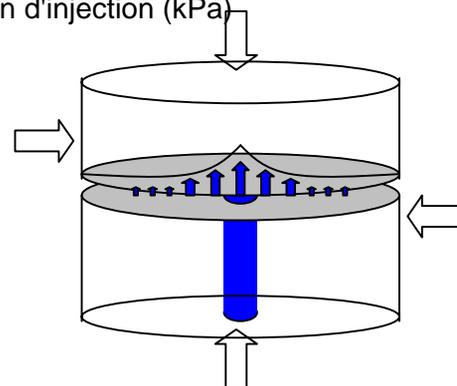
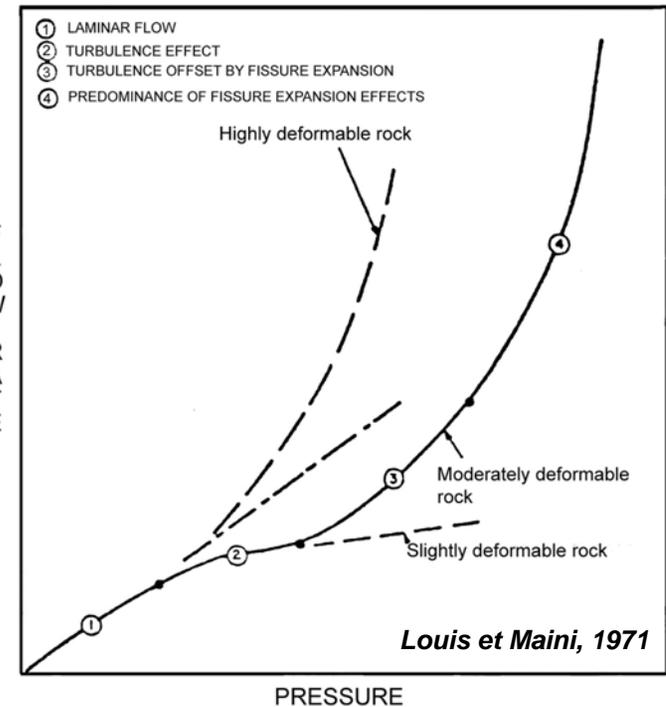
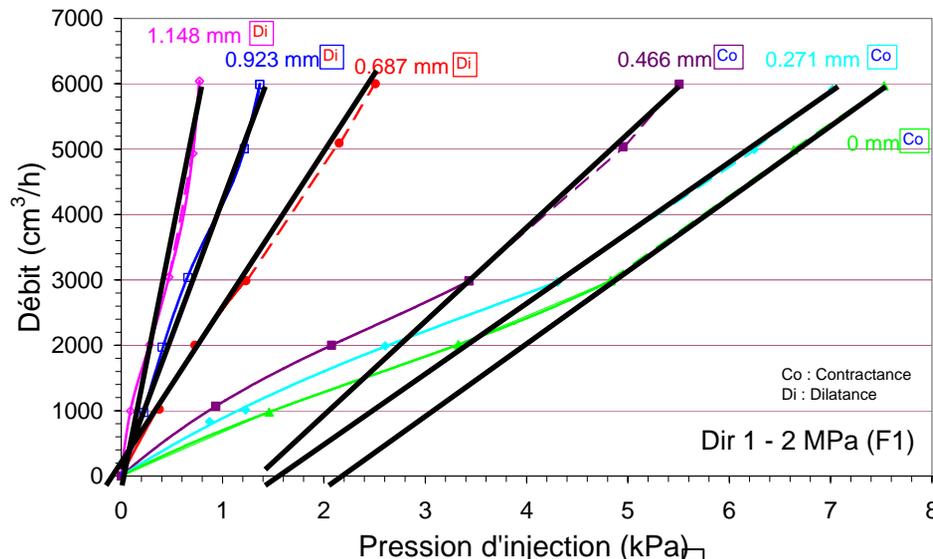


Pression > 7% de la pression totale :
dépend de la géométrie

Et en cisaillement ...?

Gentier et Pellegrino, 2003

Compréhension des phénomènes : libération partielle du cisaillement = « mini stimulation »



Déplacements tangentiels en liaison avec l'augmentation des débits : diminuent lorsque le débit augmente

De l'échantillon ... à la fracture *in situ* !

