

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie



Interactions fluides/roche en fracture: Essais de percolation THM+C*

A. Blaisonneau, S. Gentier (BRGM)
L. Bertrand, C. Poinclou (ANTEA)

(* THM+C: Thermo-Hydro-Mécanique + Chimique)



BRGM/CDG/ENE

6 Octobre 2005

Plan de l'exposé

> 1/ Présentation de l'essai de percolation THM+C

> 2/ Difficultés techniques et problèmes expérimentaux

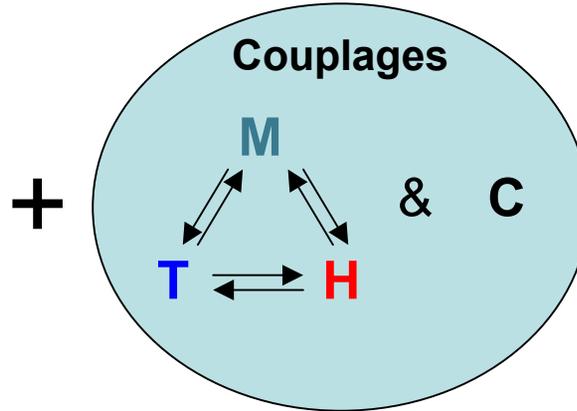
> 3/ Essai de validation

> 4/ Limites d'interprétation

> Conclusions

Contexte et objectifs (1/2)

Massifs rocheux fracturés



Circulation des fluides ?

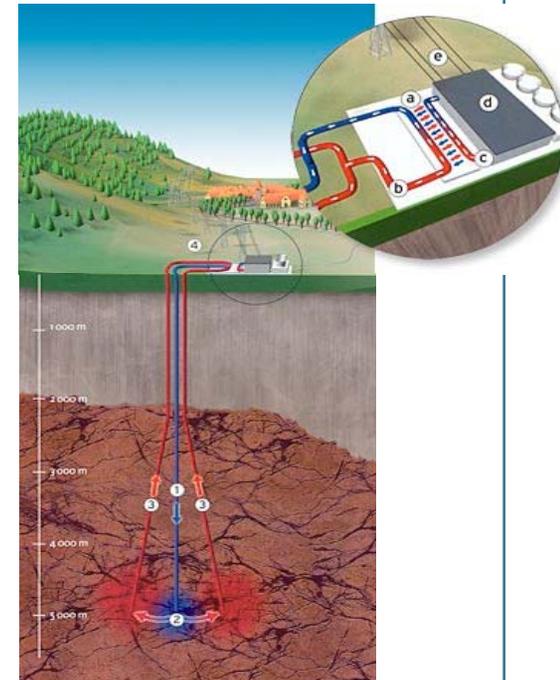
Limiter = confinement

Exemple - Problèmes de stockage de déchets

Favoriser = échanges

Exemple - Géothermie profonde

Illustration: géothermie profonde (image © GEIE)



Contexte et objectifs (2/2)

- > Développer un **dispositif expérimental** afin de collecter les données nécessaires pour la compréhension et la modélisation des conséquences des **interactions chimiques fluide/fracture dans les conditions THM des sites « Enhanced Geothermal System » (EGS)**.

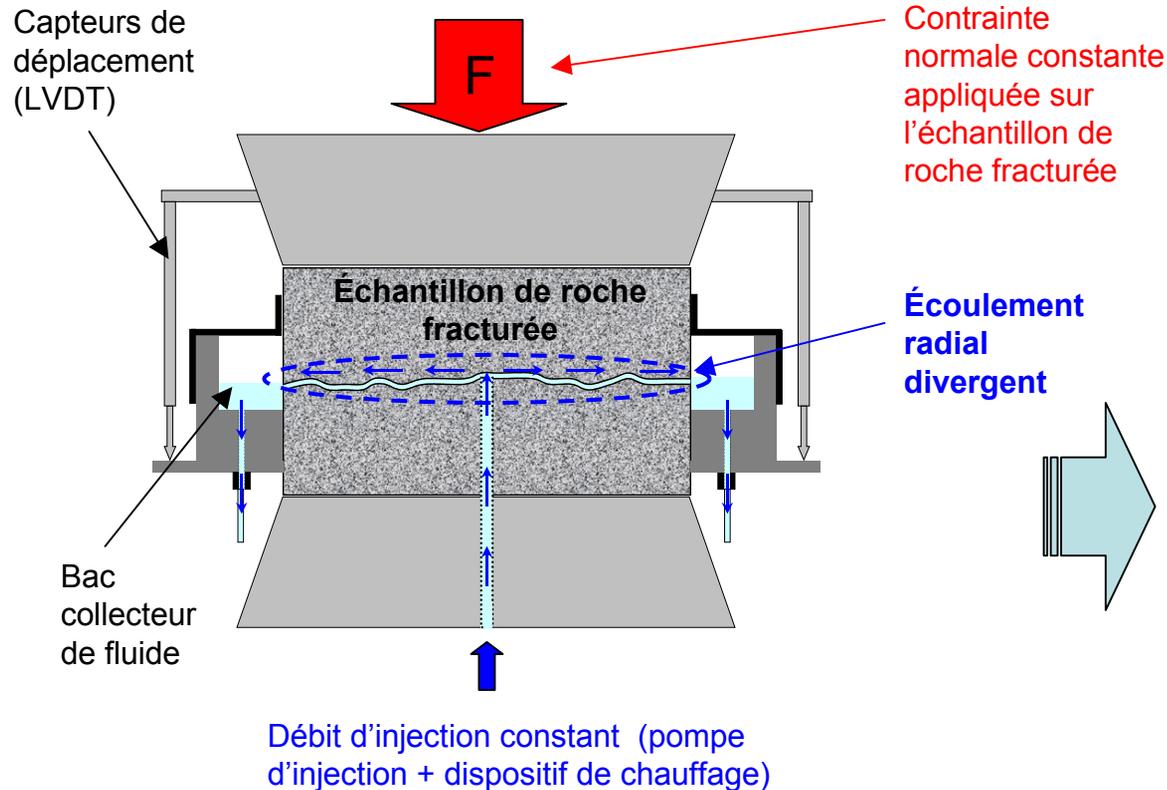


Essai de percolation THM + C en fracture (Gentier 2000) :

- *Mesurer les évolutions chimiques du fluide durant la circulation dans la fracture*
- *Évaluer l'influence potentielle des interactions chimiques fluide/fracture sur l'écoulement (évolution de la perméabilité de la fracture et des chemins d'écoulement)*

Principe de l'essai

Injection d'un fluide (avec une composition chimique connue) dans une fracture sous conditions Thermo-Hydro-Mécaniques contrôlées

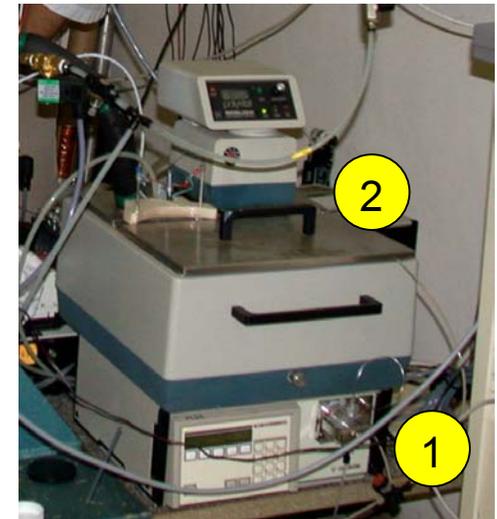
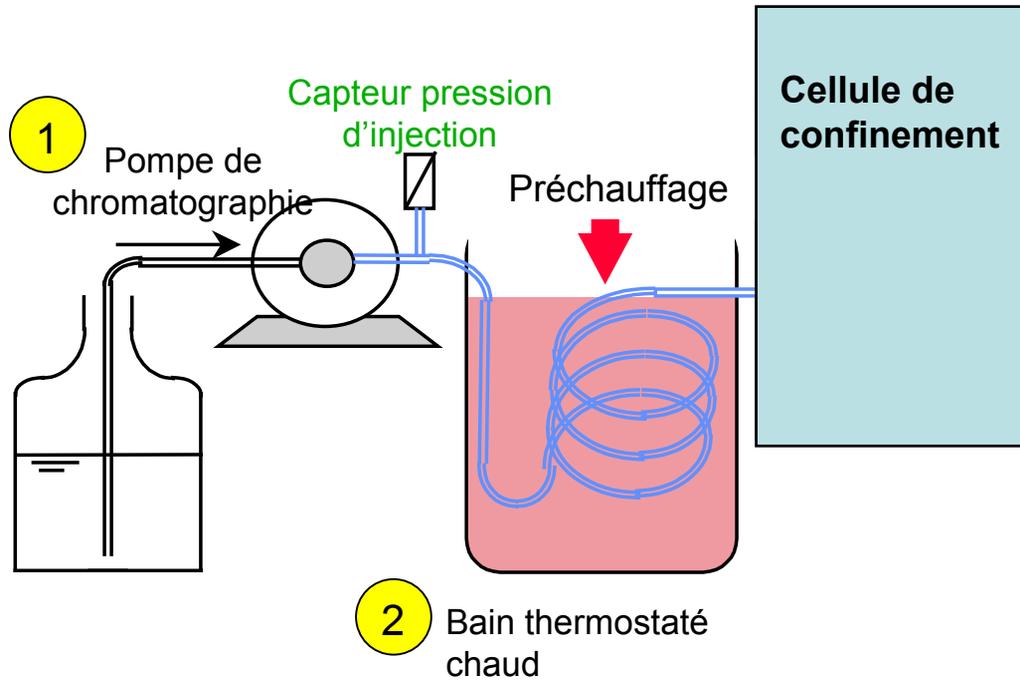


Cellule de confinement pour la régulation de la température



Dispositif d'injection

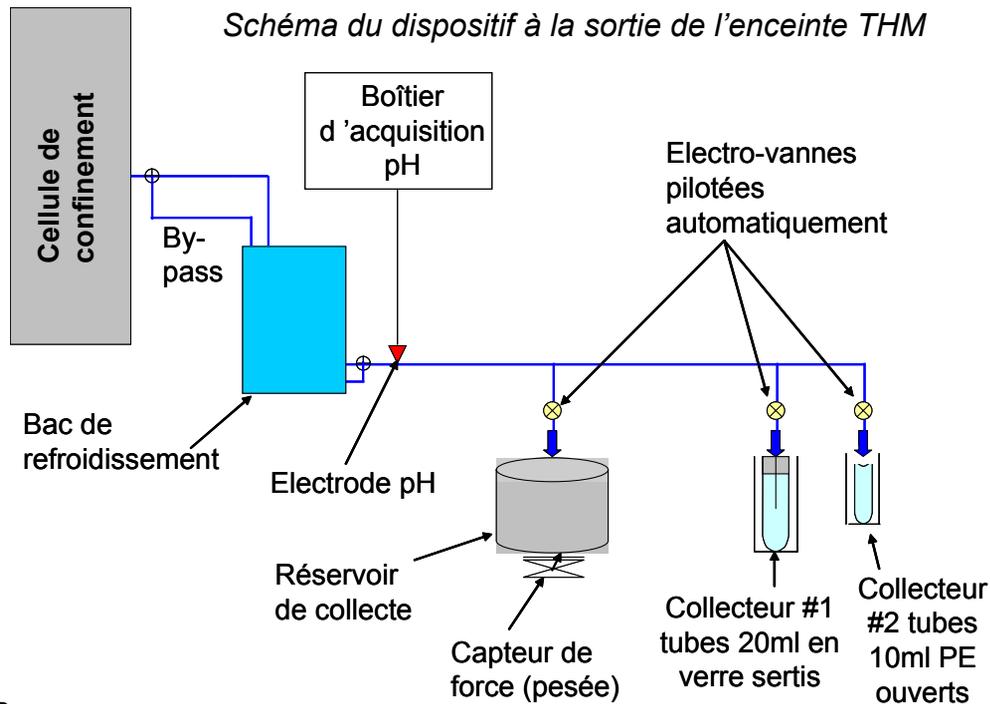
Injecter le fluide dans la fracture au débit Q_{inj} et à la température voulue



Dispositif de récupération

Le fluide collecté est expulsé de la cellule de confinement vers le dispositif en sortie:

- ➡ **contrôle du débit sortant** (pesée du fluide dans un réservoir) pour vérifier le bilan hydraulique
- ➡ **contrôle global en temps réel des évolutions chimiques, mesure du pH en ligne** (électrode pH)
- ➡ **échantillonnage du fluide pour les analyses chimiques** (laboratoire d'analyses)



Paramètres de l'essai

Paramètres	Imposés	Mesurés	Dispositifs
Mécaniques	Contrainte normale		Presse asservie en force
		Déplacements normaux relatifs des épontes de la fracture	Capteurs LVDT
Hydrauliques	Débit d'injection du fluide		Pompe de chromatographie
		Pression d'injection	Capteur de pression au centre de la fracture
		Débit sortant	Pesée par capteur de force
Thermiques	Température du fluide		Bain thermostaté + sonde PT100 au niveau du bain thermostaté + thermocouples (1 au centre de la fracture et 1 dans le réservoir annulaire)
	Température de l'enceinte		Régulateur PID + 2 à 3 sondes thermiques PT100 (en haut et au milieu de l'enceinte)

+ **chimie** : Analyses de la composition chimique des échantillons de fluide, mesure en ligne du pH

Protocole général

Mise en place



Ré-emboîtement des épontes de la fracture

Caractérisation HM



Détermination des conditions HM de réalisation de l'essai (débit d'injection, contrainte normale)

Essai de percolation



★ **Conditions THM fixées**

★ **Mesures des paramètres THM + analyses chimiques en //**

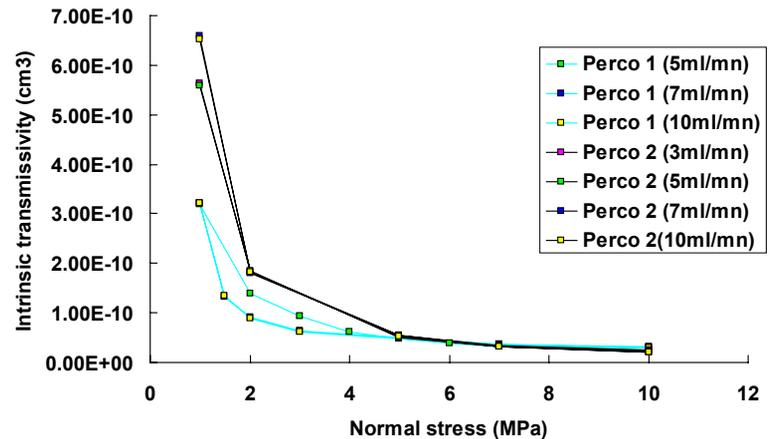
★ **Critères d'arrêt :**

- **suite à incidents en cours d'essai (pression d'injection limite, colmatage etc.)**
- **normal (chimie du fluide en sortie)**

Historique

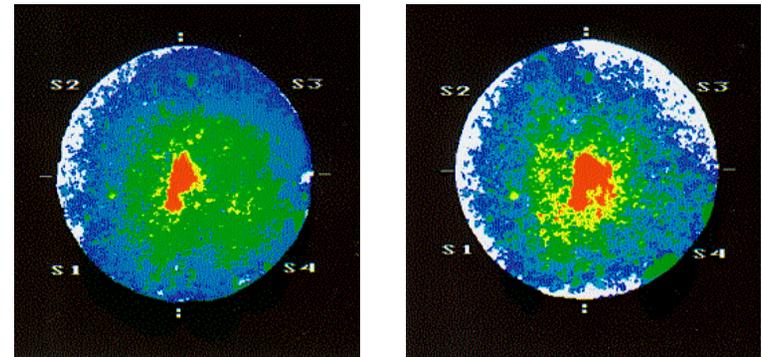
> Construction d'un prototype - projet européen (1993-1994) :

- injection d'acide dans une fracture
- faible température (40°C max)



> Adaptation au contexte géothermique (1999-2000) :

- Injection de saumure (50g/l)
- température pouvant atteindre 140-150°C : validation entreprise à 80°C

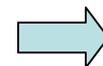
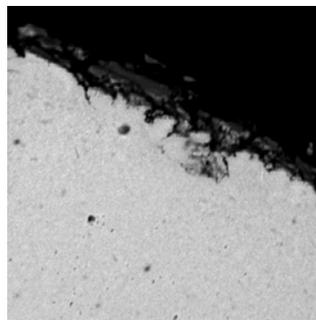


Cartes des vides (avant, après)

Problèmes techniques: circuit d'injection

Corrosion des tubes Titane du circuit d'injection:

Dépôts contenant du Fe et du Ti (fracture et bac de récupération)



Utilisation de tube en Peek

Figures de corrosion sur les tubes

Régulation thermique de l'injection (injecter le fluide à la température voulue):

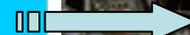
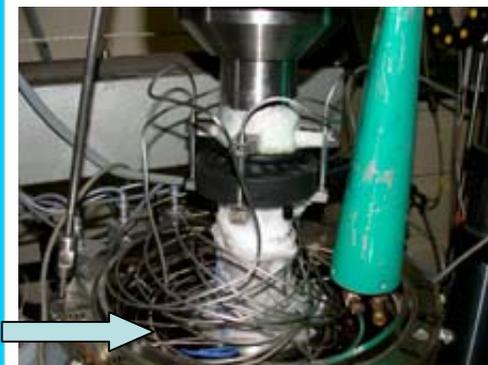
Refroidissement du fluide entre le bain thermostaté et l'enceinte de confinement



~~manchon chauffant (résistance)~~



enroulement du tube d'injection dans le bas de l'enceinte ?

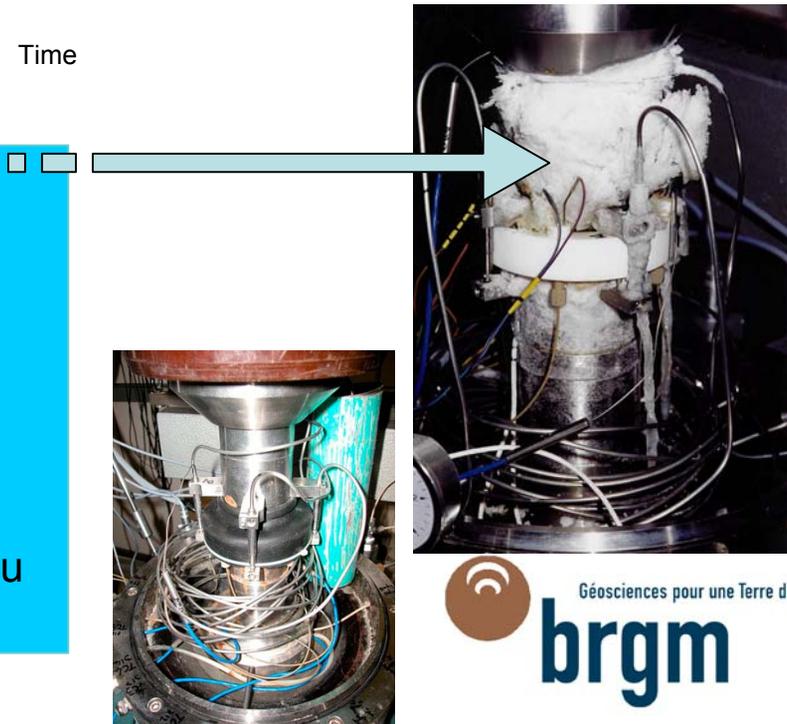
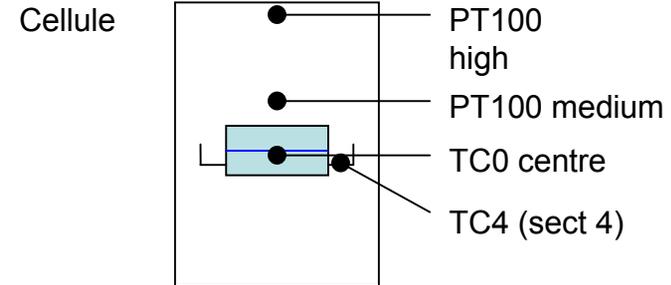
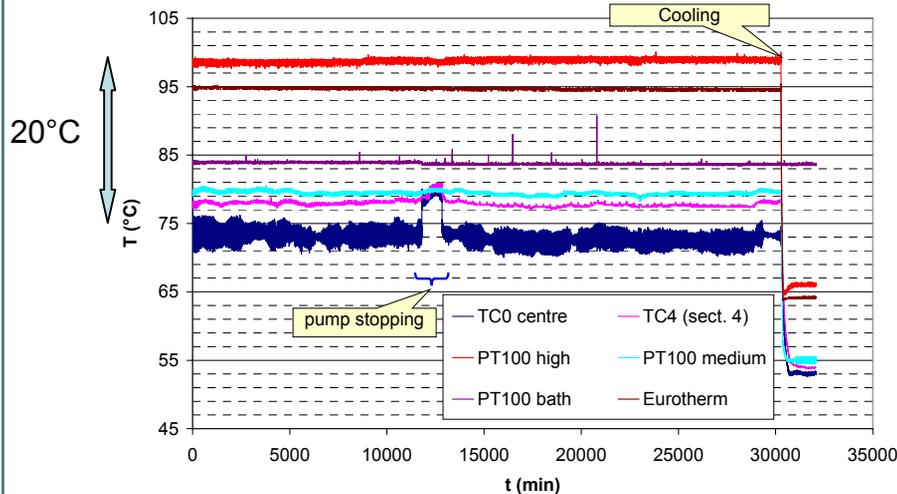


Géosciences pour une Terre durable

brgm

Problèmes techniques: cellule de confinement

Gradient thermique entre le haut et le bas de l'enceinte



Dépôts salins :

- Évaporation du fluide dans le bac de récupération avec la présence d'azote sec ?

➔ **Saturation de l'azote**

- Croissance de feuillets salins par remontée capillaire ?

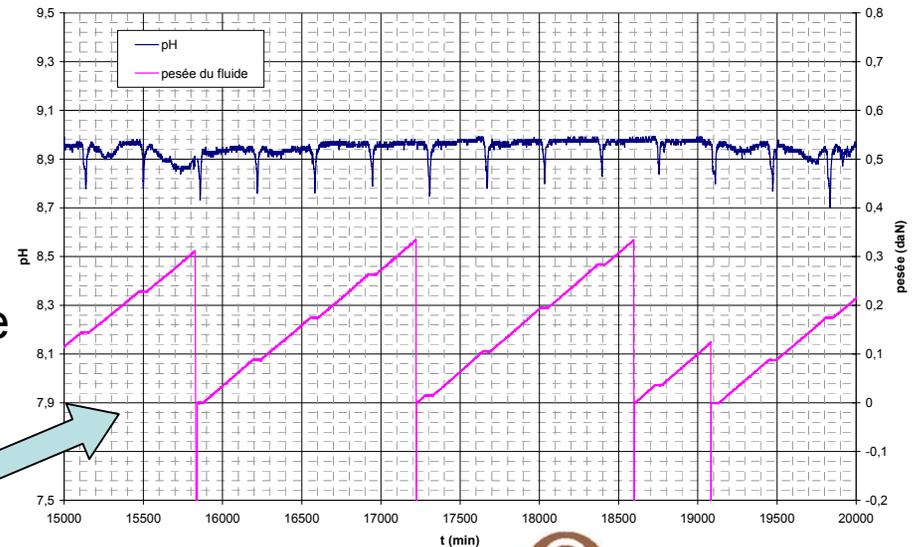
➔ **Membrane en Butyle** sur le dessus du bac récupérateur

Problèmes techniques: échantillonnage des fluides et dispositif en sortie

> Échantillonnage dans les tubes sertis : contre-pression lors du remplissage du tube

> Pilotage automatique des électrovannes (passage pesée/échantillonnage):

- Problème de synchronisation = Déphasage entre le pilotage des électrovannes et le pilotage des passeurs
- Vérification du débit lorsque la fréquence d'échantillonnage est grande (peu de fluide dirigé vers le réservoir pour la pesée)
- Dessaturation de l'électrode pH : décrochement des mesures

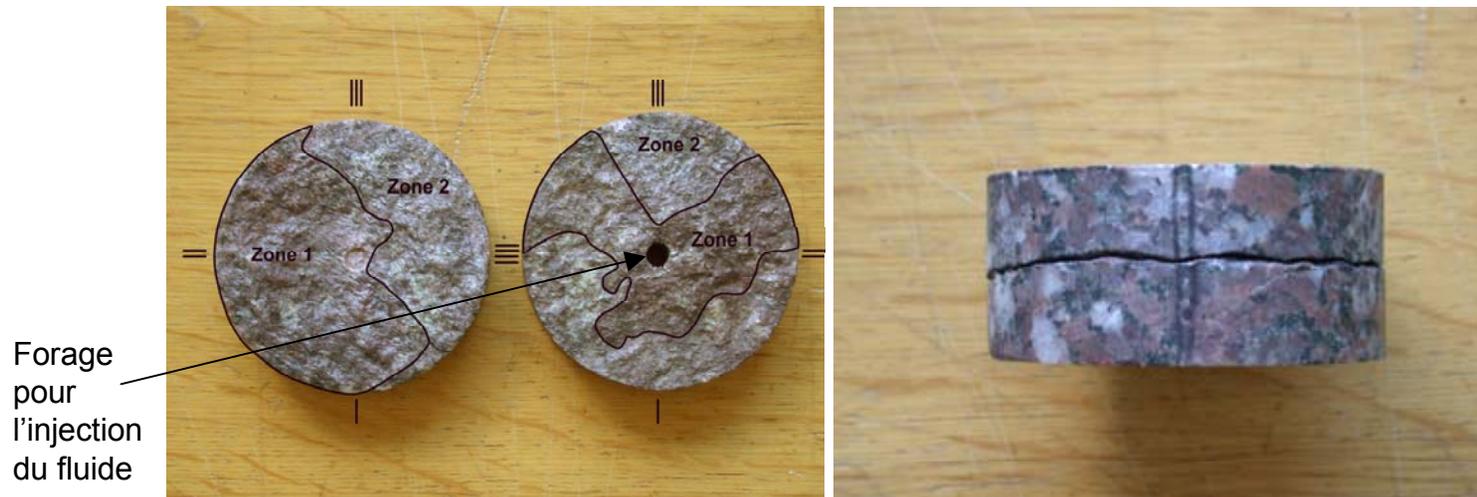


Essai de validation 1/8

Objectif de cet essai : Valider le dispositif expérimental

Échantillon réalisé à partir d'une carotte provenant du forage EPS1 (Soultz, 1530 m de prof.)

Diamètre: 70 mm et hauteur : 32 mm



Matrice rocheuse: Granite standard du site de Soultz (granite porphyroïde) avec de petites variations (feldspaths de tailles plus petites que celles du granite standard de Soultz).

Fracture: naturelle sans marques de cisaillement. Les épontes de la fracture présentent un remplissage partiel de calcite et d'hématite (zone 1), dans les autres parties la matrice rocheuse affleurant directement en surface (zone 2).

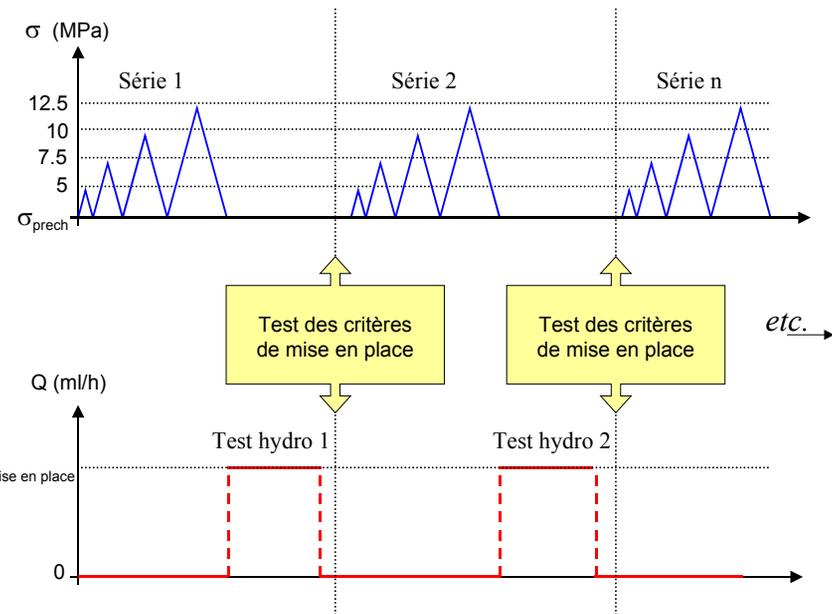
Essai de validation 2/8 : Conditions d'acceptabilité

> Mise en place

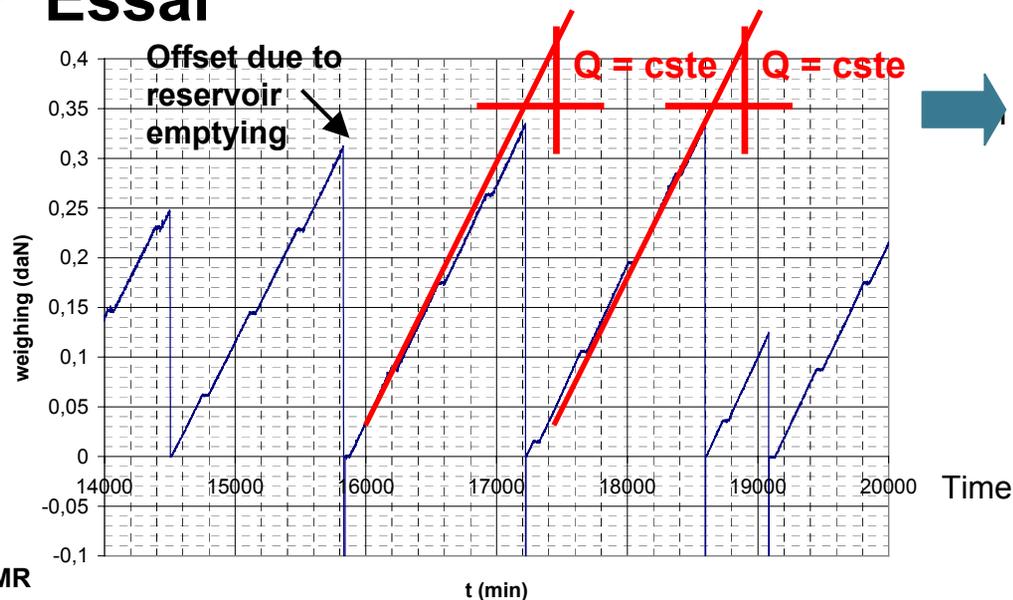
Cycles en contrainte + Test hydro (débit imposé)

Critères de mise en place:

- **Critère mécanique** : fermeture moyenne irréversible à la précharge < à $5 \mu\text{m}$
- **Critère hydraulique** : écart entre réponses (pression d'injection) à deux injections successives = 10%



> Essai



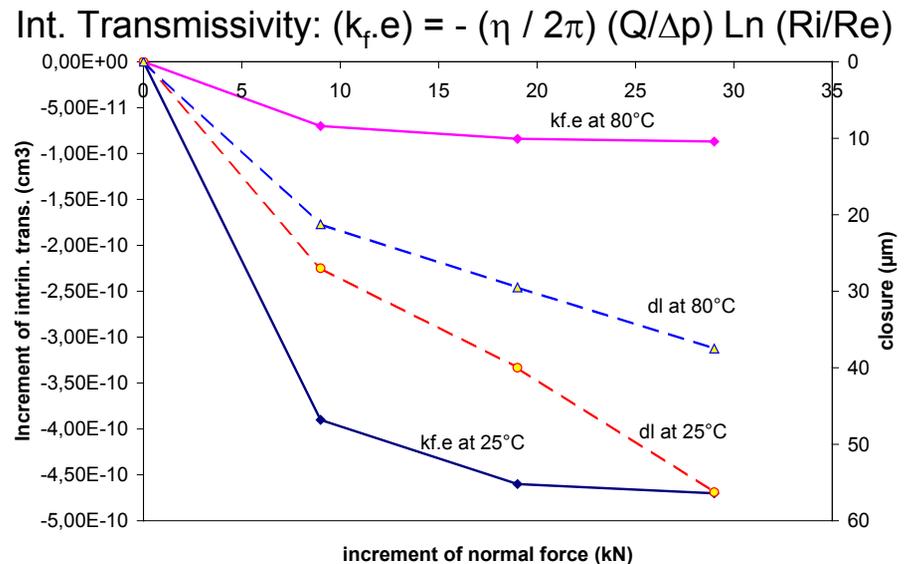
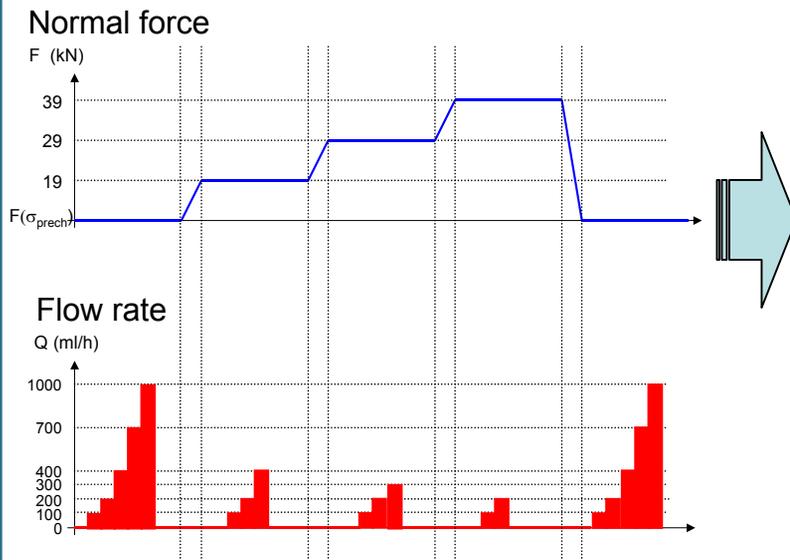
➔ hydraulique (conservation des débits)
: erreur acceptable = 10%

Essai de validation 3/8

Caractérisation hydromécanique du comportement de la fracture

2 tests : 25°C et 80°C

Injection d'un **fluide chimiquement non réactif**



Essai de validation 4/8

Conditions de réalisation de l'essai de percolation à 80°C

tests HM ➡ Débit d'injection $Q = 20 \text{ ml/h}$ et contrainte normale appliquée $\sigma = 5,5 \text{ MPa}$

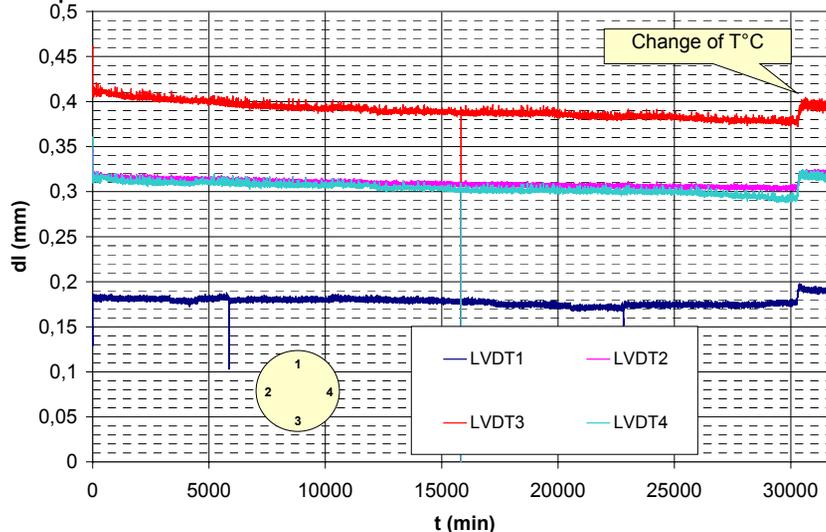
Le fluide injecté : composition chimique proche du **fluide du site de Soultz** mais avec une **salinité deux fois plus faible (50 g/l)**. Chimiquement réactif avec les minéraux de l'échantillon de roche. Afin d'éviter les problèmes de scaling et de colmatage dans le dispositif le fluide a été calculé pour être thermodynamiquement à l'équilibre avec la calcite, la baryte et la silice amorphe.

Pilotage des électrovannes : la **fréquence d'échantillonnage** est ajustée sur la **réactivité du système** (1 échantillon/heure au début à 1 échantillon toutes les 6 heures).

La durée « espérée » de l'essai était de 3 semaines.

Essai de validation 5/8

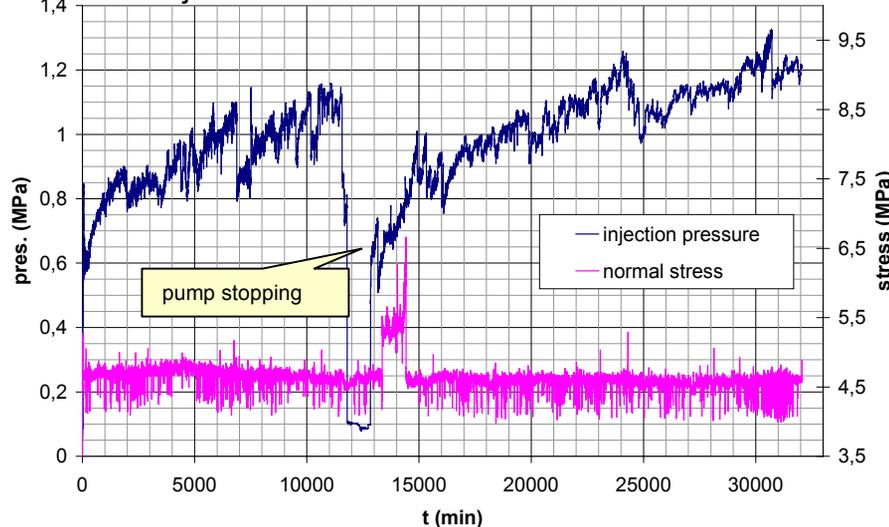
Déplacement relatif normal



Durant les 21 jours du test
**tendance globale : fermeture
de la fracture**

- **Altération chimique progressive des points de contacts (phénomène chimique)?**
- **Fluage des points de contact (phénomène mécanique)?**

Pression d'injection et contrainte normale



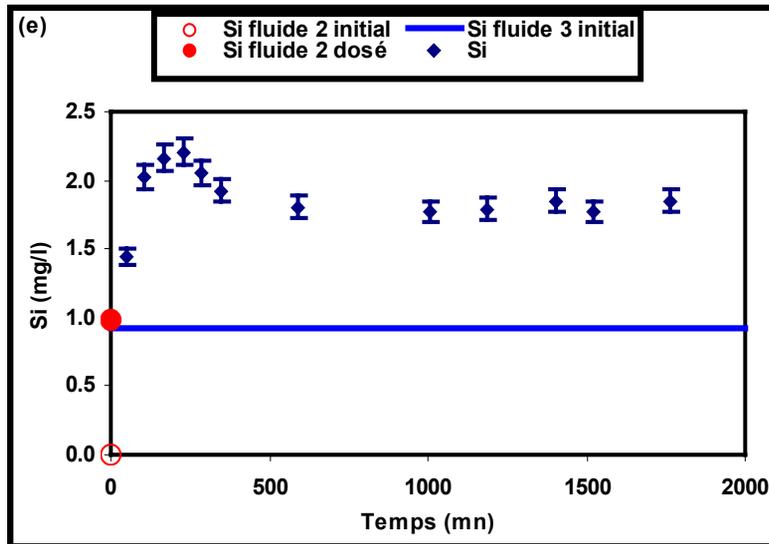
Augmentation globale de la
pression d'injection moyenne :
diminution de la perméabilité de
la fracture

- **Bouchage des chemins d'écoulement?**
- **Fermeture progressive de la fracture?**

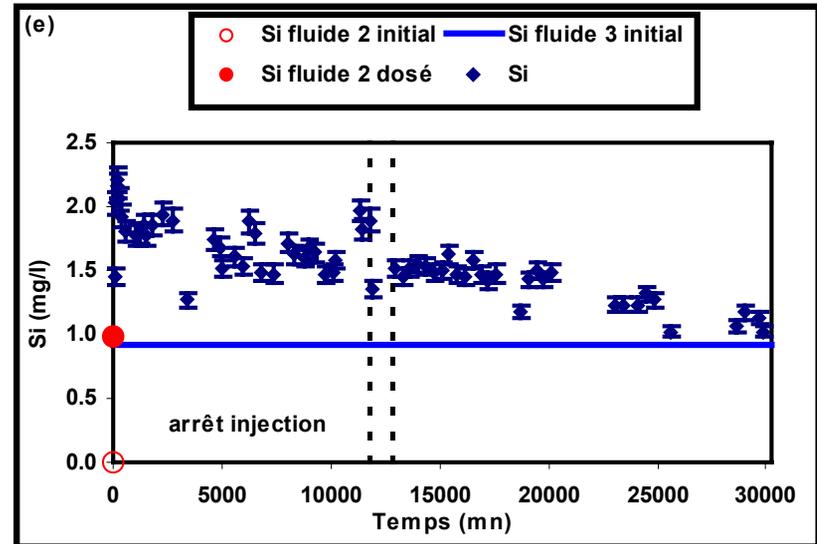
Essai de validation 6/8

- Augmentation de la teneur en Si, Al, Ba dans le fluide (les feldspaths de Soultz contiennent du Ba)

Exemple: évolution du Si



During the first hours



During the 21 days of the test

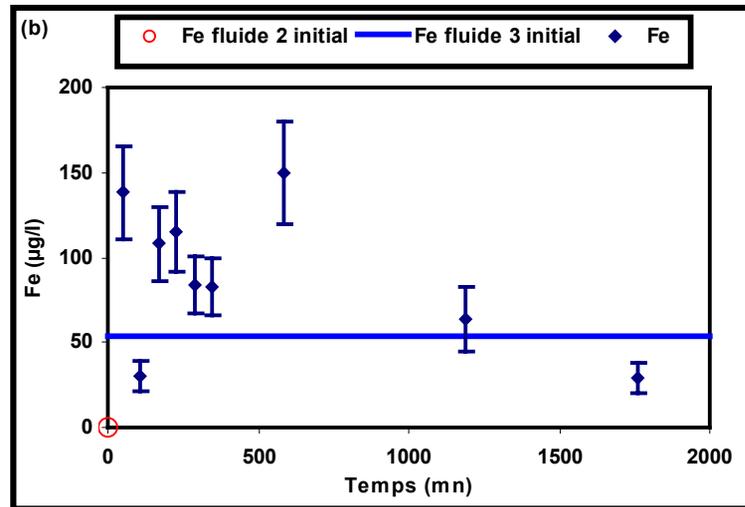
➔ dissolution des espèces aluminosilicatées

Essai de validation 7/8

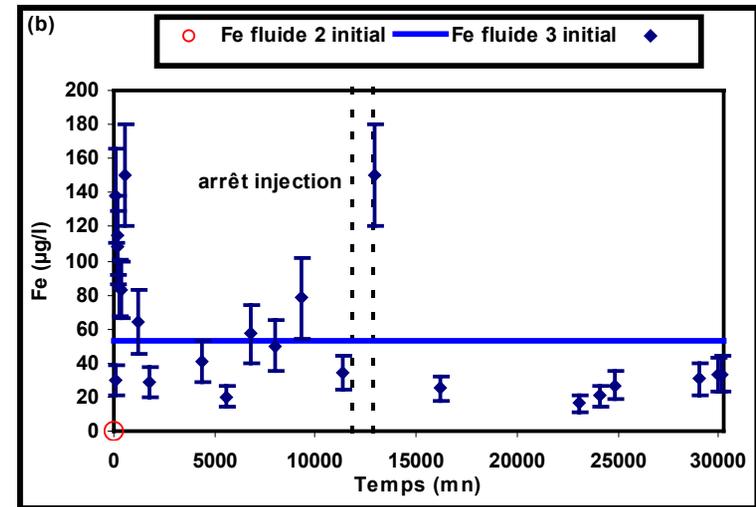
- Teneur en Fe :

- Au début, teneur en Fe plus élevée que la teneur initiale ➡ dissolution de minéraux contenant du Fe (remplissage d'hématite dans la fracture?)

- Après 16 jours, la teneur reste en dessous de la teneur initiale ➡ incorporation partielle du Fe dans des colloïdes



During the first hours



During the 21 days of the test

- Pour les autres espèces chimiques: pas de variation significatives de la teneur

Les principales interactions fluide/roche sont rapides : enrichissement du fluide en (Si, Al, Ba, Fe) durant les premiers jours du test ➡ apparemment une dissolution non sélective des principaux minéraux primaires du granite

Essai de validation 8/8

Conclusions de l'essai de percolation à 80°C

> **Un essai de percolation en fracture avec un fluide réactif a été réalisé pendant 21 jours**

- Le dispositif expérimental permet de contrôler et d'assurer la bonne réalisation du test.
- Les données récoltées permettent de caractériser l'évolution du comportement hydraulique et mécanique global de la fracture.
- L'évolution de la composition chimique du fluide a été déterminée.



Validation du dispositif expérimental

> **L'allure générale du comportement de la fracture et son évolution durant la percolation à 80°C (fermeture progressive de la fracture, augmentation progressive de la pression d'injection, dissolution des minéraux primaires du granite)**



Nécessité d'analyses et d'essais complémentaires:

Caractérisation des épontes avant et après (carte des vides, morphologie, carte chimique, carte des points de contact), essais complémentaires (fluage des points de contacts? Approfondir l'étude des couplages : effet de la température, de la contrainte normale...)

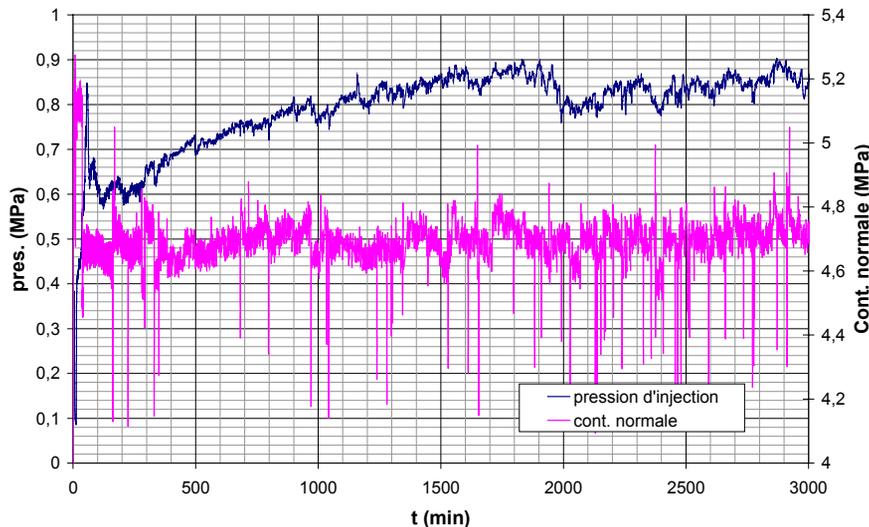
Limites d'interprétation: mesures

> Effets thermiques sur les mesures de déplacements

Correction des mesures pour prendre en compte les effets thermiques:

- Régime thermique permanent : analyse ok en déplacements relatifs (fermeture/ouverture de la fracture relative à l'état initial)
- Régime thermique transitoire : nécessité d'évaluer les effets thermiques sur les déplacements mesurés (dilatation du système de mesure etc.) → *essais thermomécaniques complémentaires*

> Perturbations dues au dispositif expérimental



Perturbations liées à la régulation de la force par la presse (faibles contraintes) et à-coups de la pompe de chromatographie (injection) → *Analyse "fine" des mesures de déplacements et de la pression d'injection (analyse des extrema locaux)?*

Limites d'interprétation : analyse du comportement de la fracture

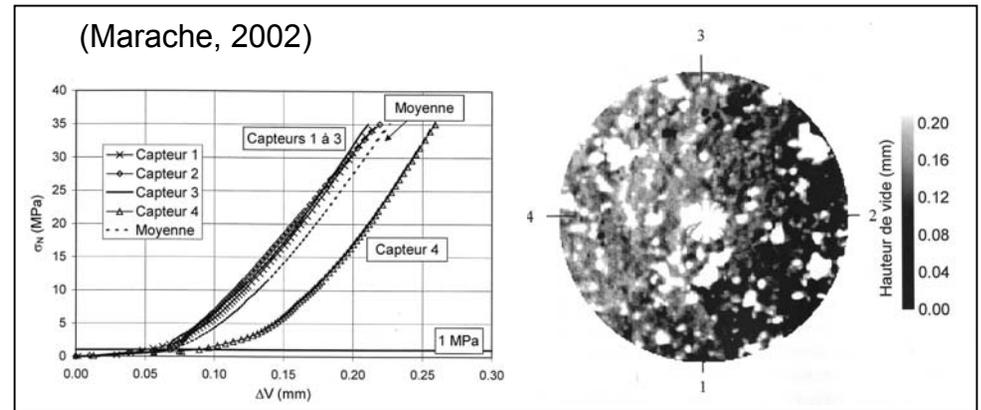
> Mécanique:

- Mesure des déplacements :

Différences entre les capteurs

→ analyser la géométrie de l'espace des vides

comment relier la mesure réalisée par un capteur avec une zone de la fracture?

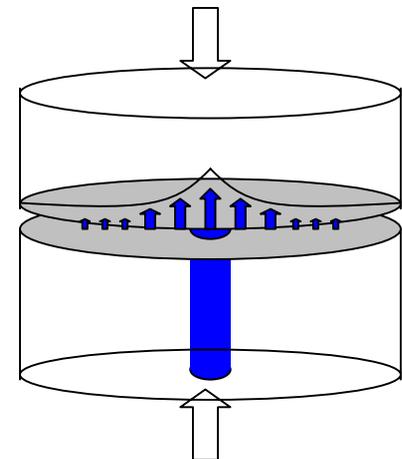


> Hydraulique:

- Pression d'injection mesurée au centre de la fracture et connue sur les bords (pression dans le réservoir de collecte) : **Profil de pression dans la fracture? Régime hydraulique dans la fracture?**

- Caractérisation des points d'émission du fluide (chenalisation de l'écoulement)

- Allure « locale » de l'évolution de la pression d'injection (colmatage/décolmatage de chenaux etc.)



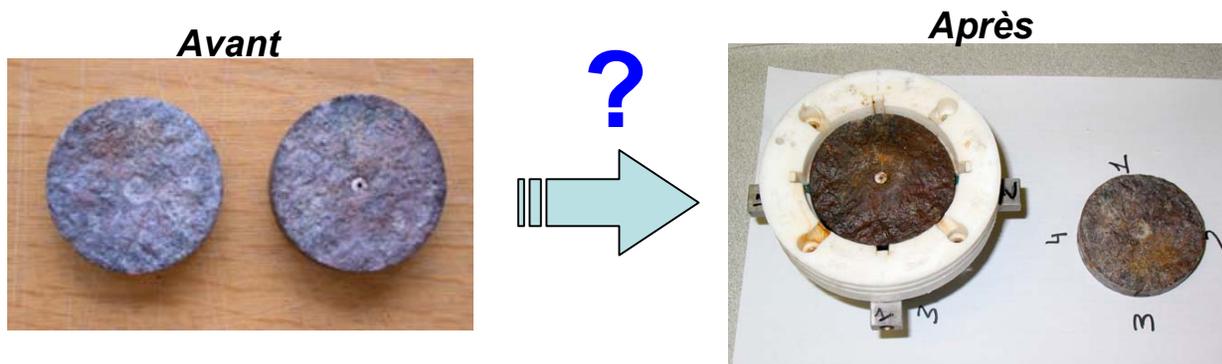
Limites d'interprétation : analyse du comportement de la fracture

- > À t donné, comportement global (déplacements, pression d'injection, composition chimique du fluide en sortie):

Comment établir une relation ou non entre les différents paramètres mesurés?

Par ex. : une augmentation momentanée de la pression d'injection est-elle liée à une fermeture locale de la fracture (mécanique) ou à un colmatage de chemin d'écoulement (chimie)?

Caractérisation des épontes de la fracture (analyse morphologique, carte des vides, points de contact, carte chimique): impossible durant l'essai au temps t???



Conclusions

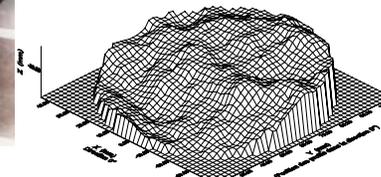
> **Essais de percolation THM+C = complexes** (technique, interprétation et analyse des mesures et du comportement)

➔ **La compréhension des résultats nécessitent :**

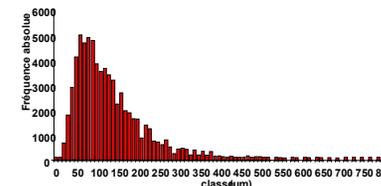
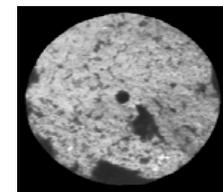
- Caractérisation approfondie des épontes de la fracture



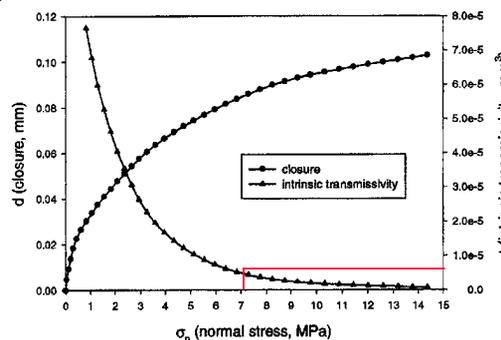
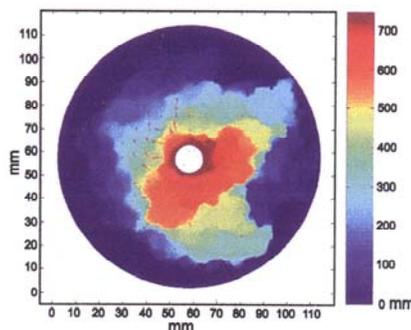
- Réalisation d'essais complémentaires (essais mécaniques, essais thermomécaniques etc.)



- Réalisation de modélisations complémentaires



Capasso et al., 2000



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



CFMR

Charges hydrauliques

Chemical evolutions of the fluid

Analysed species:

- Ca, Mg, K, Na, Si, Ba, Al, Fe, Sr
- chlorides, sulphates
- inorganic dissolved carbon, gaseous CO₂
- alcalinity and the pH



Various Analytical methods (spectrometer of sequential atomic emission, ICP/MS Plasma Quad 3, ionic chromatography etc.)

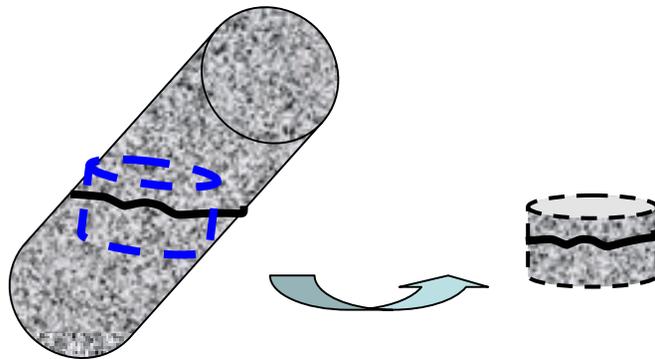
Problèmes techniques: réalisation de l'échantillon

À partir du **matériau naturel** disponible (par ex.: carottes réalisées en forages):



➡ Identifier un ensemble « fracture + matrice rocheuse » (matrice non fracturée)

➡ Isoler la fracture et sur-carotter pour réaliser l'échantillon (fracture le + possible // aux faces de l'échantillon)



➡ Réaliser le forage central sur l'éponte inférieure pour l'injection

Limite d'interprétation : échantillon naturel



Utilisation d'un échantillon de roche fracturé **naturel** (? répliques):

+ « vraies » épontes et « vrais » composants (minéraux, matériaux de remplissage dans la fracture etc.) : comportement (THM et chimique) « proche » d'une fracture *in situ*

- pas de **reproductibilité** des essais (1 essai et des résultats « uniques »)

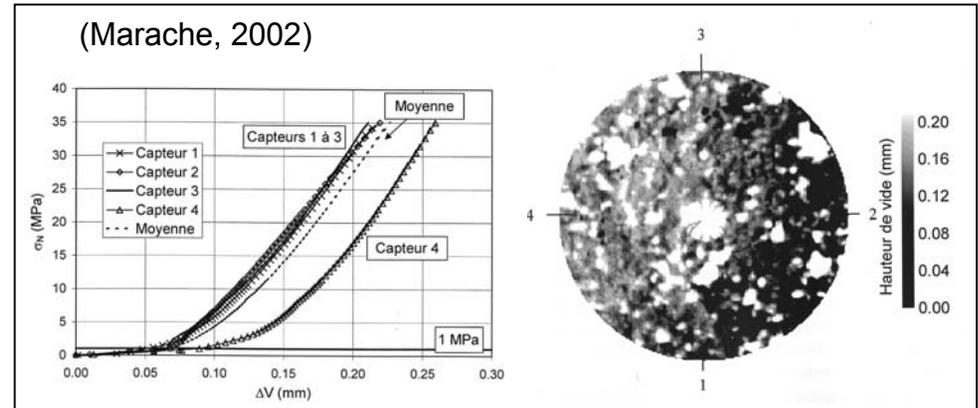
Limites d'interprétation : mesures et résultats 1/3

> Mécanique:

- Mesure des déplacements :

Différences entre les capteurs
analyser la géométrie de
l'espace des vides

*comment relier la mesure réalisée
par un capteur avec une zone
de la fracture?*



- **Contrainte normale sur la fracture?** problème de parallélisme entre le plan moyen de la fracture et les parties supérieure et inférieure de l'échantillon

- **Comportement global ? local**
(cisaillement local etc...)

