

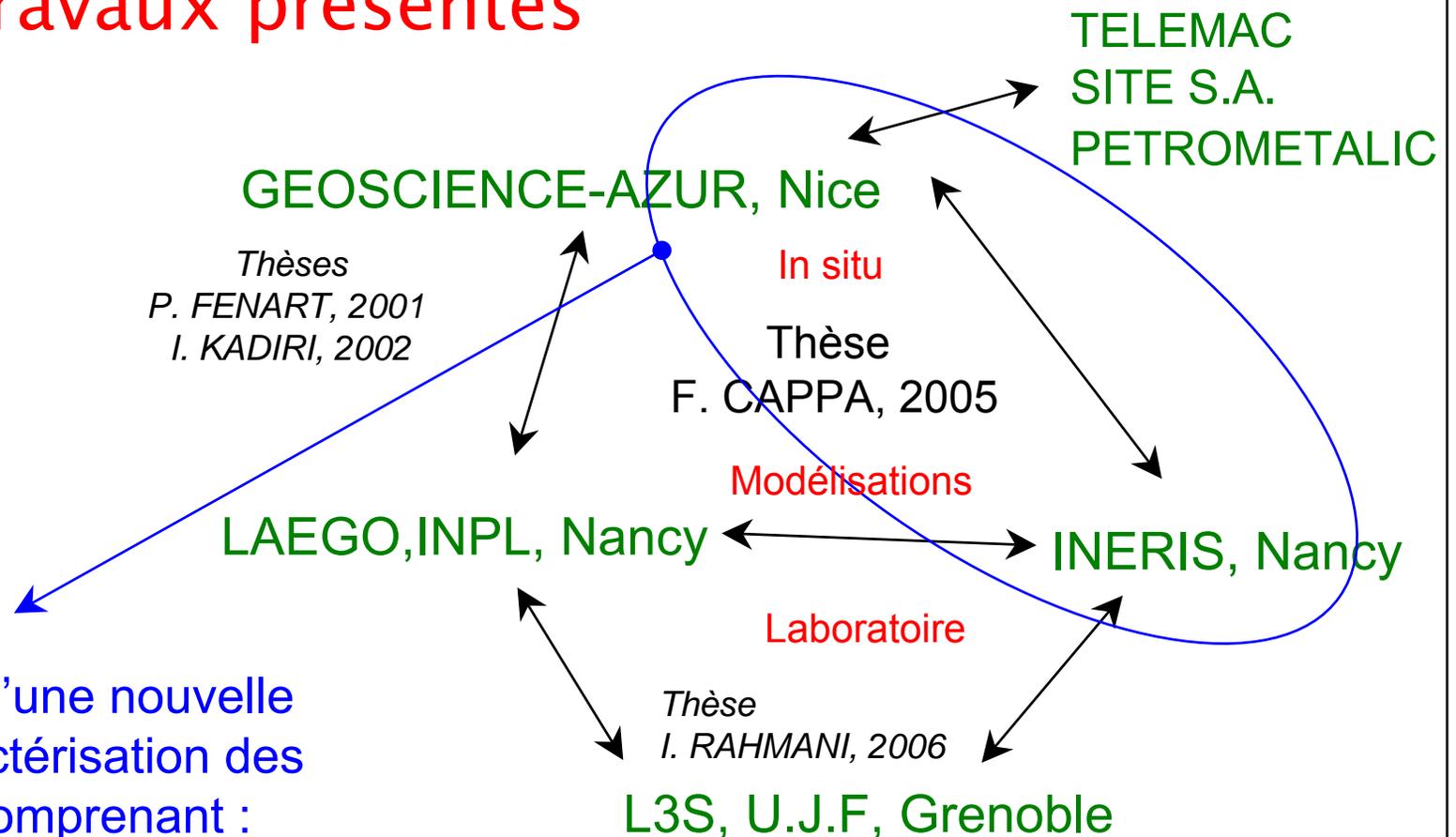
Journée sur les « Discontinuités et joints dans les massifs rocheux » organisée par le LCPC (jeudi 24 mai 2007)

Caractérisation hydromécanique des fractures in-situ Apport de la modélisation numérique

A. Thoraval

INERIS

Cadre des travaux présentés



Développement d'une nouvelle méthode de caractérisation des fractures in situ comprenant :

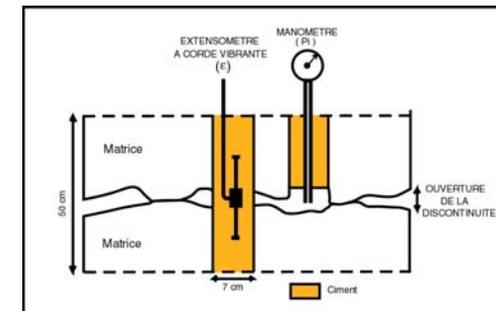
- ✓ la mise au point d'une sonde de mesure couplée hydromécanique (baptisée HPPP*)
- ✓ la mise au point d'un protocole d'interprétation basé sur l'utilisation de modèles numériques

* HPPP : High-Pulse Poroelasticity Probe (brevet en cours de dépôt par Y. GUGLIELMI, GEOSCIENCE-AZUR)

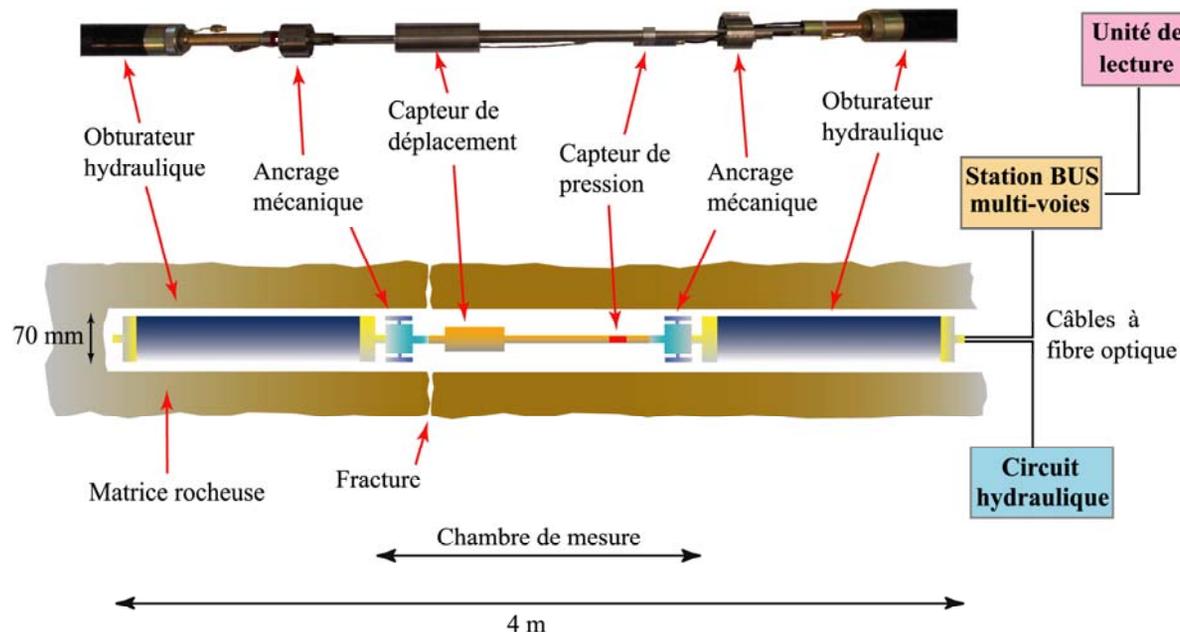
Mise au point d'une sonde permettant d'améliorer la qualité des mesures in situ

Mesures classiques (réalisées initialement sur site)

- ✓ extensomètres à corde vibrante (précision : $1 \mu\text{m/m}$)
- ✓ capteurs de pression interstitielle (précision : 1 kPa)
- ✓ fréquence d'acquisition: 2 mesures/mn ($1/30 \text{ Hz}$)



Mise au point d'une sonde amovible basée sur la technologie des fibres optiques (HPPP)



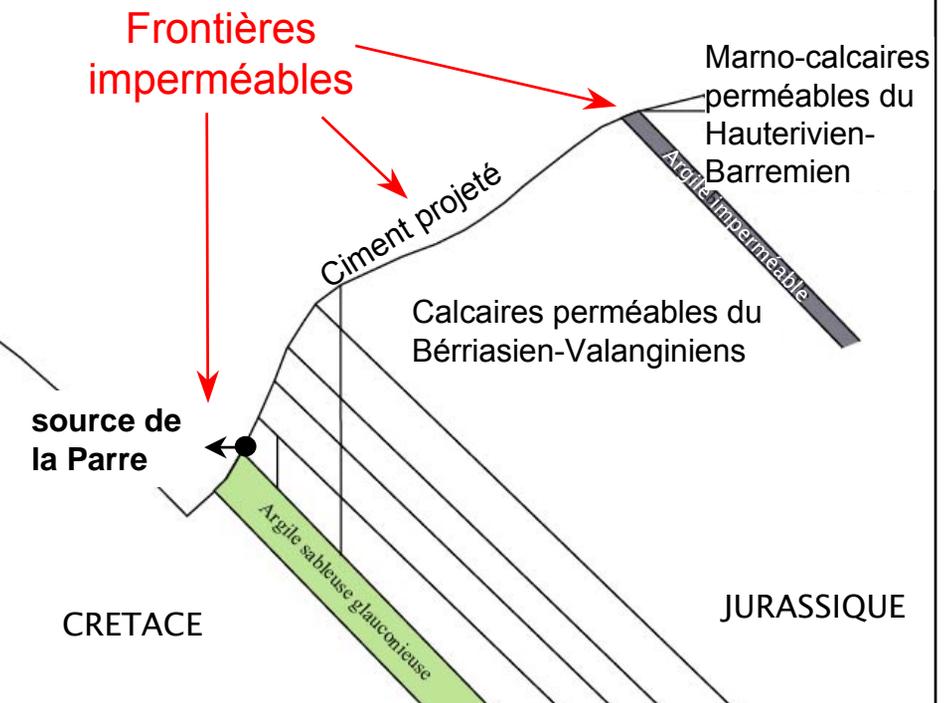
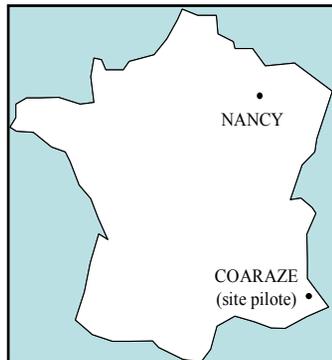
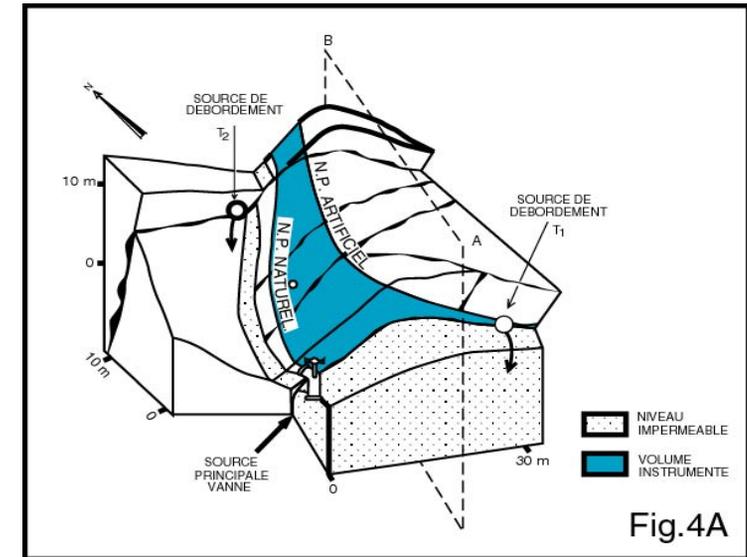
- ✓ mesures de déplacement plus précises : $0,1 \mu\text{m/m}$
- ✓ capteurs plus petits
- ✓ grande rapidité de réponse : 120 Hz
- ✓ mesures non affectées par le champ magnétique

✓ Perspectives de développement et de compactage de la sonde prévues par GEOSCIENCE-AZUR

Réalisation de mesures sur le site expérimental de Coaraze

Caractéristiques du site

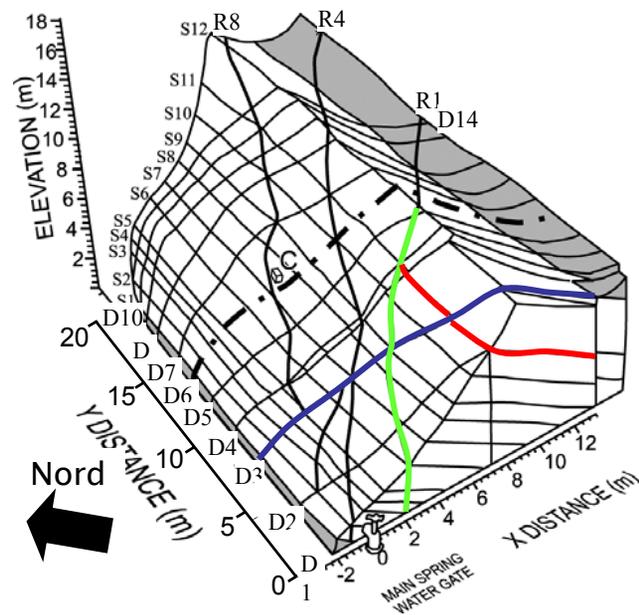
- ✓ Bloc calcaire stratifié découpé par des failles drainantes
- ✓ Présence d'une source sur laquelle a été installée une vanne (débit moyen annuel de 10 l/s)
- ✓ Conditions géométriques, hydrauliques et mécaniques bien connues aux limites de la zone étudiée



Reconnaissance de la fracturation du site

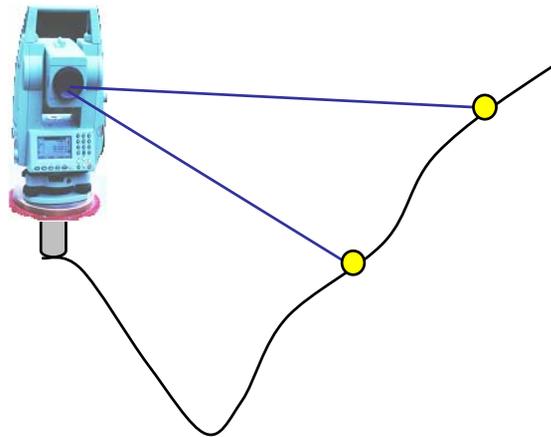
3 familles principales de discontinuités
d'orientation moyenne :

- / (S) joints de stratification :
azimut N40, pendage 45 SE
- / (D) failles : azimut N120 à N140,
pendage 75 à 90 NE
- / (R) failles : azimut N50 à N90,
pendage 70 à 80 NW



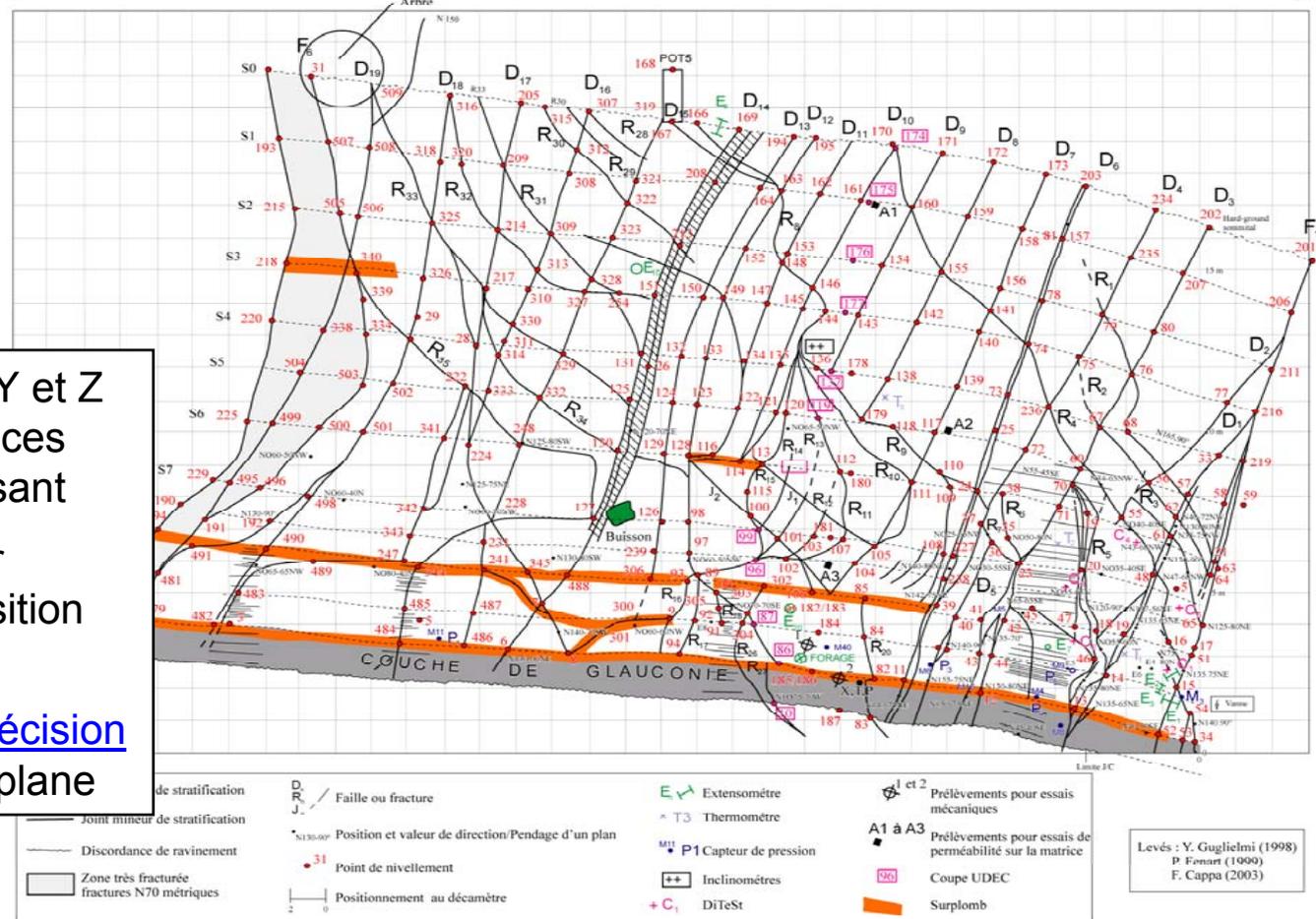
Visualisation sur photo des traces des
fractures principales du site de Coaraze

Mesure précise de la position et de l'orientation des fractures par levés tachéométriques



Visualisation des points mesurés

- ✓ Mesure des coordonnées X, Y et Z de points positionnés sur les traces visibles des fractures sur le versant
- ✓ Traitement des mesures pour déterminer l'orientation et la position des différentes fractures
- ✓ Détection des sources d'imprécision points colinéaires, fracture non plane



Levés : Y. Guglielmi (1998)
P. Fournier (1990)
F. Cappa (2003)

Caractérisation hydromécanique du site expérimental

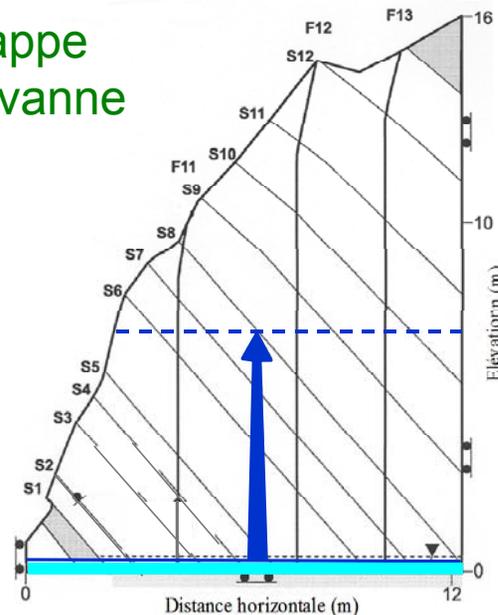
Démarche :

- ✓ Réalisation d'expérimentation *in situ* (2 types de sollicitation hydraulique)
- ✓ Mesures de la réponse hydromécanique (à l'aide de différents dispositifs de mesures)
- ✓ Interprétation des expérimentations à l'aide de modèles analytiques et numériques

Sollicitation globale

Remontée de la nappe
par fermeture de la vanne

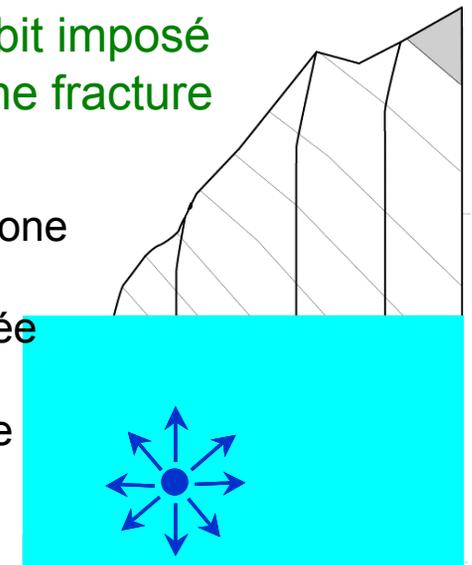
- ✓ Zone d'intérêt : toutes les fractures
- ✓ Présence d'une zone initialement non-saturée



Sollicitation locale

Pression ou débit imposé
en un point d'une fracture

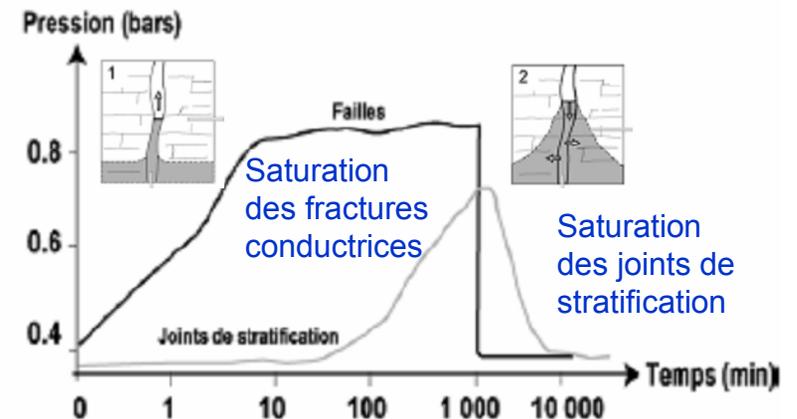
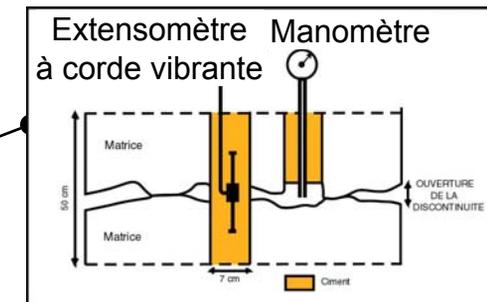
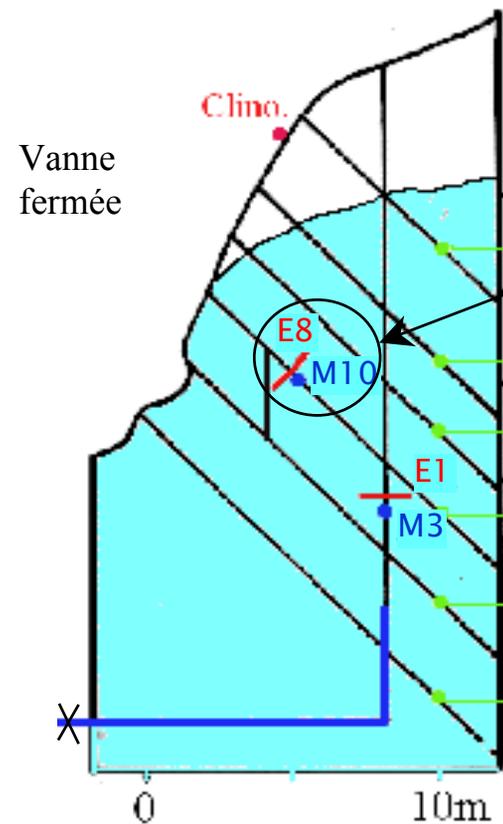
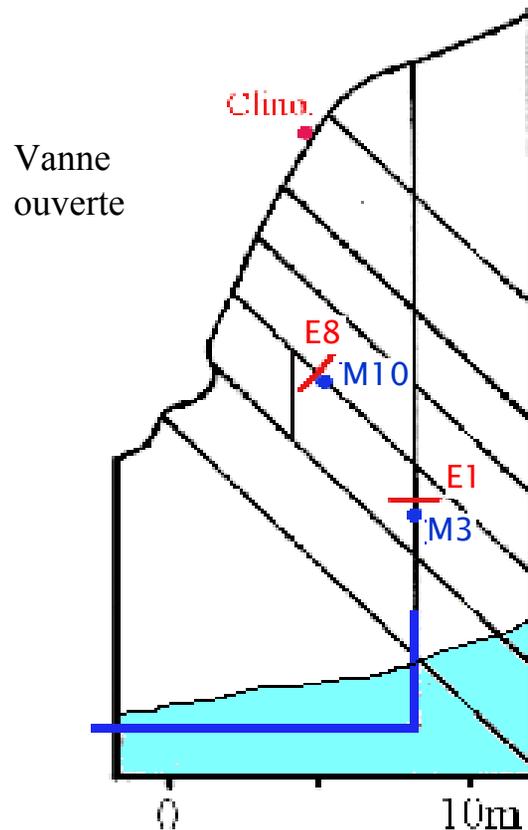
- ✓ Zone d'intérêt : zone limitée autour de la fracture instrumentée
- ✓ Condition saturée à proximité de la zone sollicitée



Sollicitation globale remontée de la nappe par fermeture de la vanne de la vanne

Instrumentations mise en place [Guglielmi, 1999]

- ✓ Extensomètres à corde vibrante (GLOZL®) : 1 $\mu\text{m}/\text{m}$
- ✓ Capteurs de pression interstitielle : 1 kPa
- ✓ Inclinomètres de type IPG (conçu par P.A. Blum) et fabriqués par TELEMAC® : 10^{-6} rad (en dépl. : 0,1 μm)
- ✓ Station d'acquisition (CAMPBELL®) : freq. = 1/30Hz

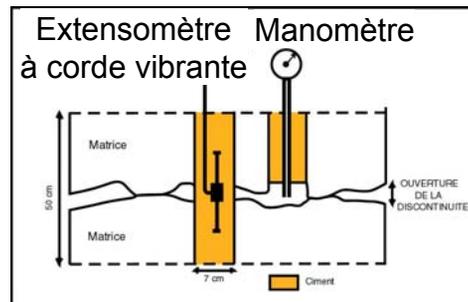


Mesure de la réponse du site à la sollicitation globale

$$\Delta P, \Delta u_n = f(\text{temps})$$

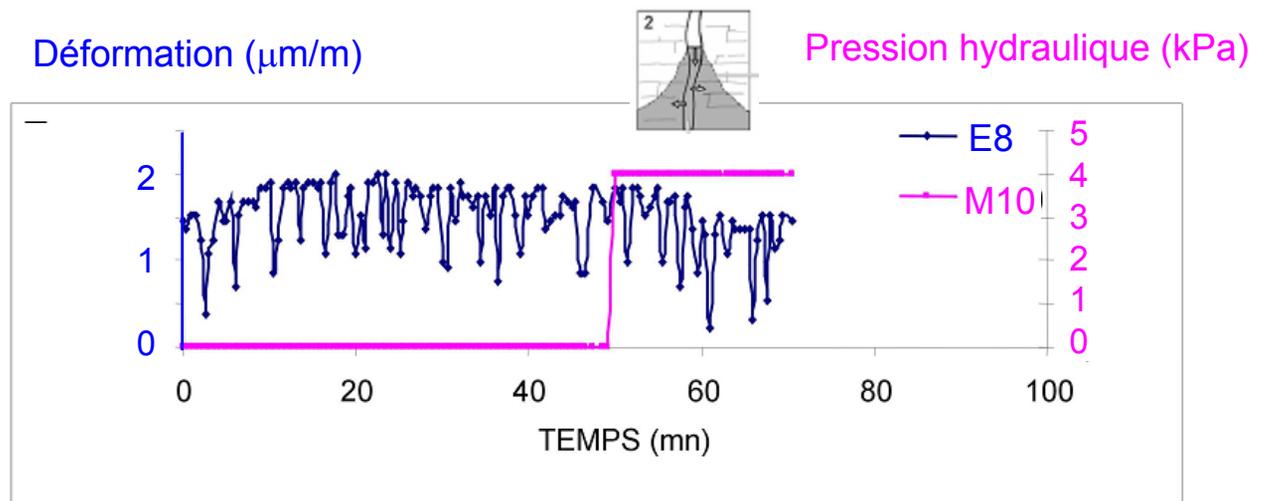
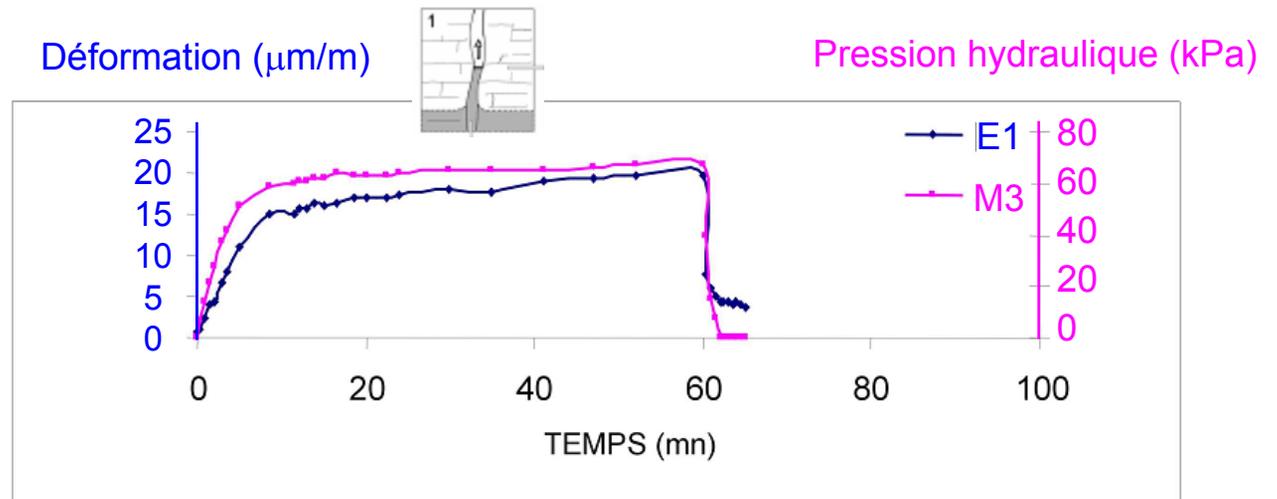
Dans les fractures conductrices :

corrélation entre ΔP et Δu_n



Dans les joints de stratification :

pas de corrélation claire entre ΔP et Δu_n

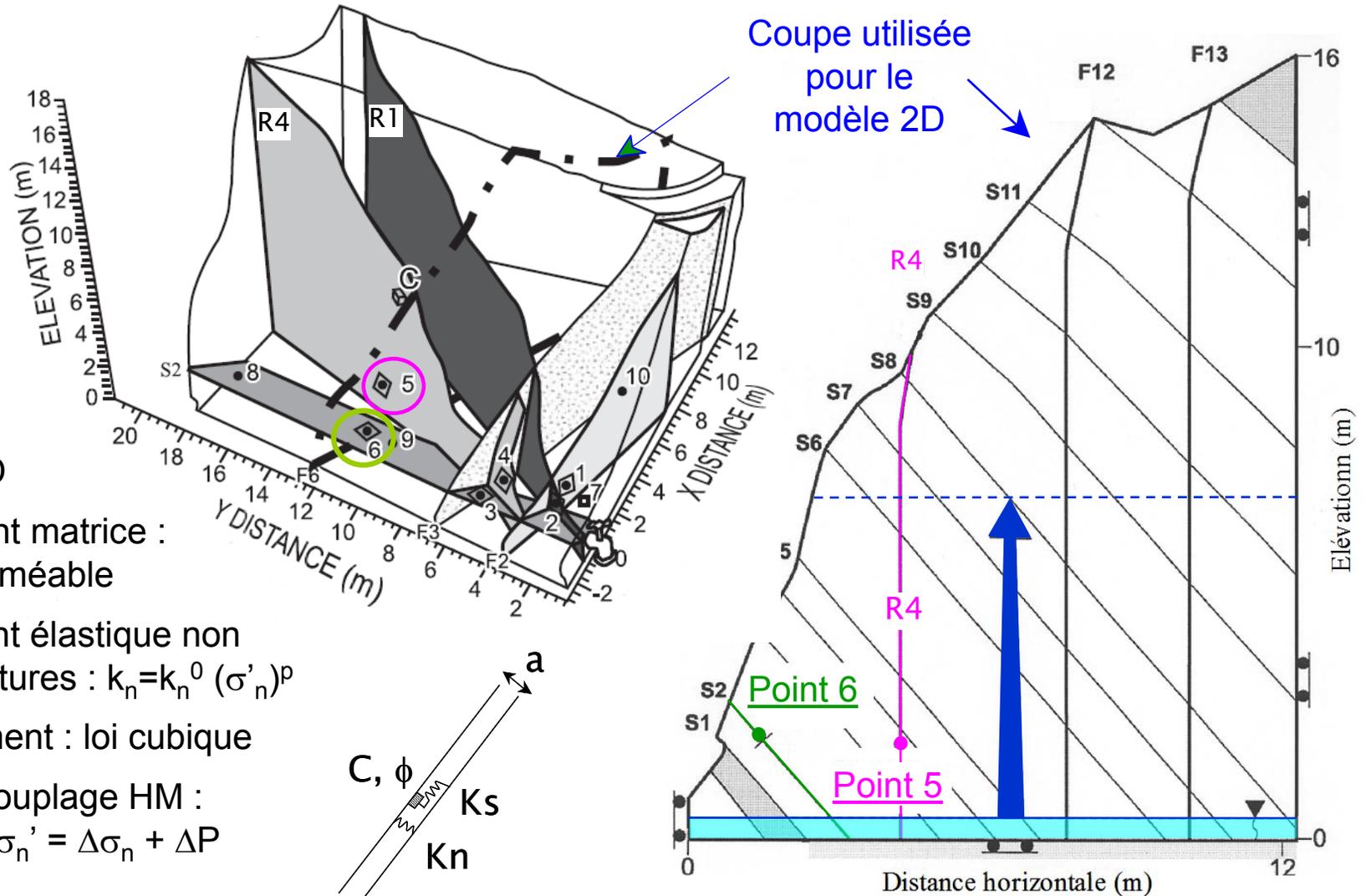
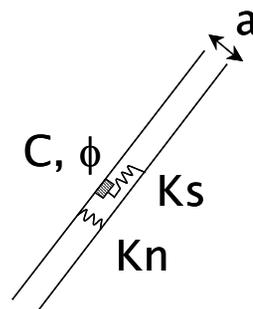


Interprétation à l'aide d'un modèle 2D

(travaux initiés dans le cadre de la thèse I. KADIRI (2002)/LAEGO)

Hypothèses du modèle :

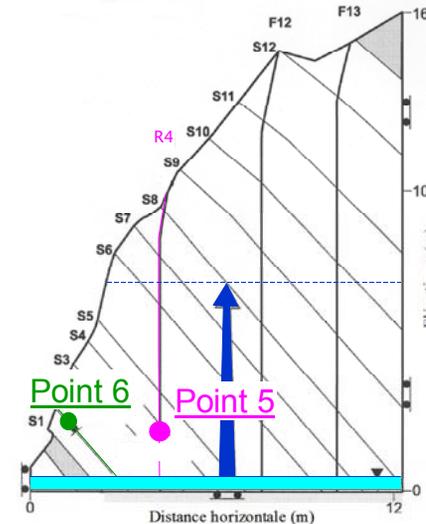
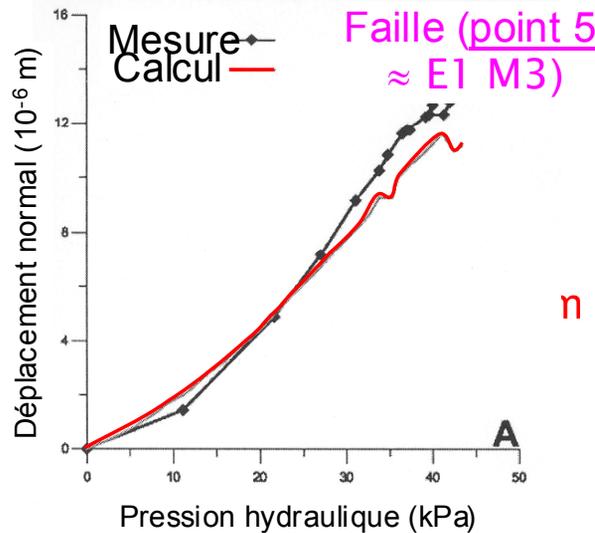
- ✓ Géométrie 2D
- ✓ Comportement matrice : élastique, imperméable
- ✓ Comportement élastique non linéaire des fractures : $k_n = k_n^0 (\sigma'_n)^p$
- ✓ Loi d'écoulement : loi cubique
- ✓ Relation de couplage HM : $a = a_0 + \Delta u_n$; $\Delta \sigma'_n = \Delta \sigma_n + \Delta P$



Interprétation à l'aide d'un modèle 2D (suite)

$$\Delta U_n = f(\Delta P)$$

✓ Calage du modèle parfaitement réalisé pour la fracture R4



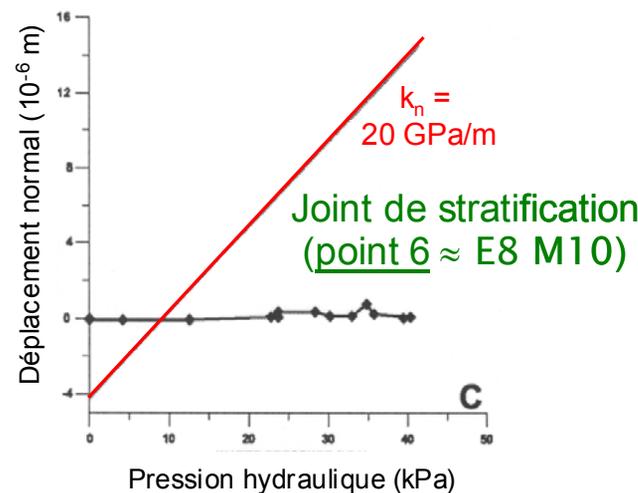
⇒ la loi de couplage
 $\Delta \sigma'_n = \Delta \sigma_n - \Delta P$
 convient pour la faille ...

... mais pas pour le joint de stratification

$$\Rightarrow \Delta \sigma'_n = \Delta \sigma_n - \Delta P [1 - S_c]$$

[Duveau et al., 1997]

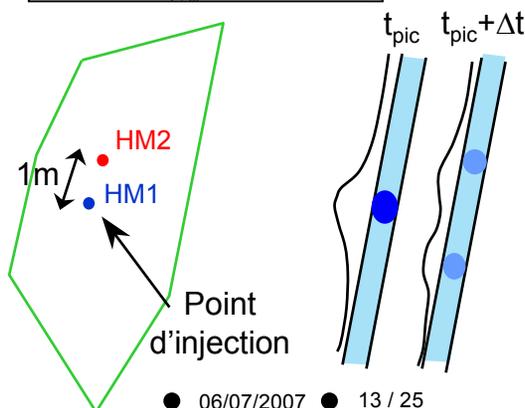
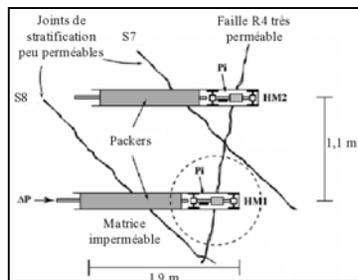
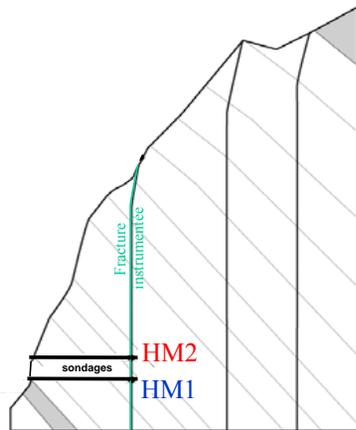
✓ Impossible de reproduire les variations observées au niveau d'un joint de stratification (sauf à supposer $k_n > 200$ GPa/m)



Voir travaux de laboratoire sur l'impact de la morphologie et de la surface de contact sur la loi de couplage réalisés dans le cadre d'une collaboration INERIS - L3S - LEAGO [présentations prévues aux colloques ISRM Lisbonne et IFM Grenoble en 2007]

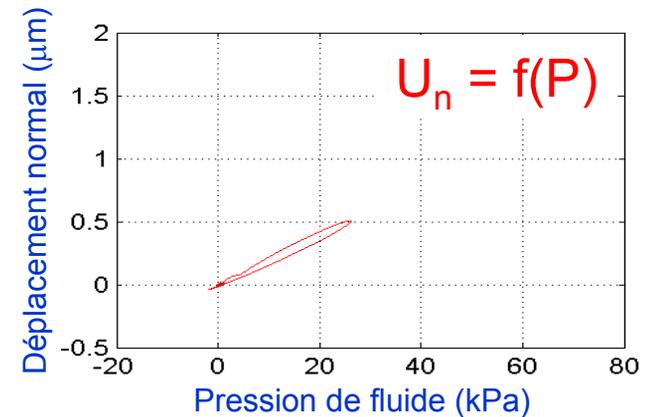
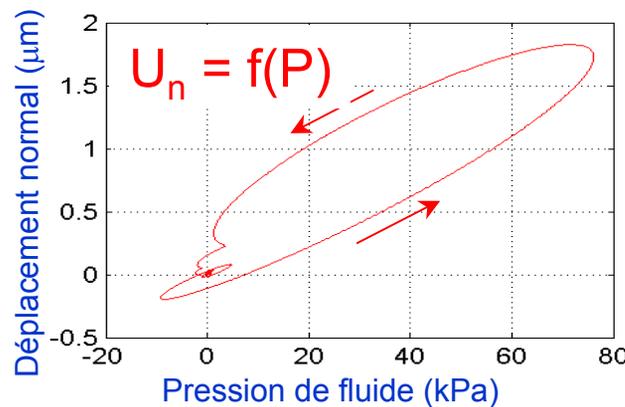
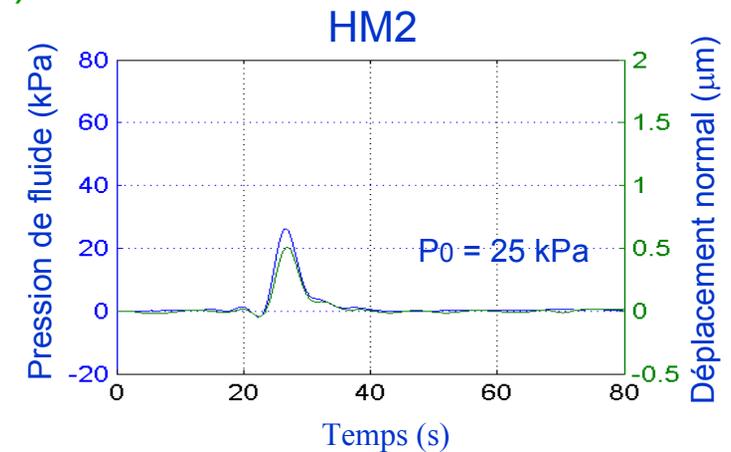
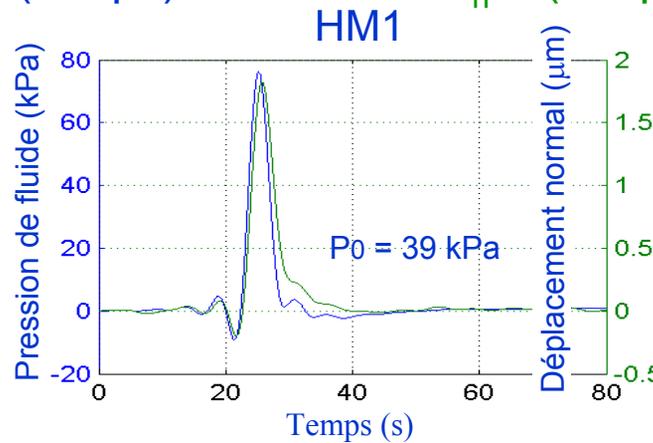
Sollicitation locale de courte durée (pulse-test)

Injection rapide d'un faible volume d'eau (environ un litre)
au niveau de l'intersection de la fracture R4 avec un forage



$P = f(\text{temps})$

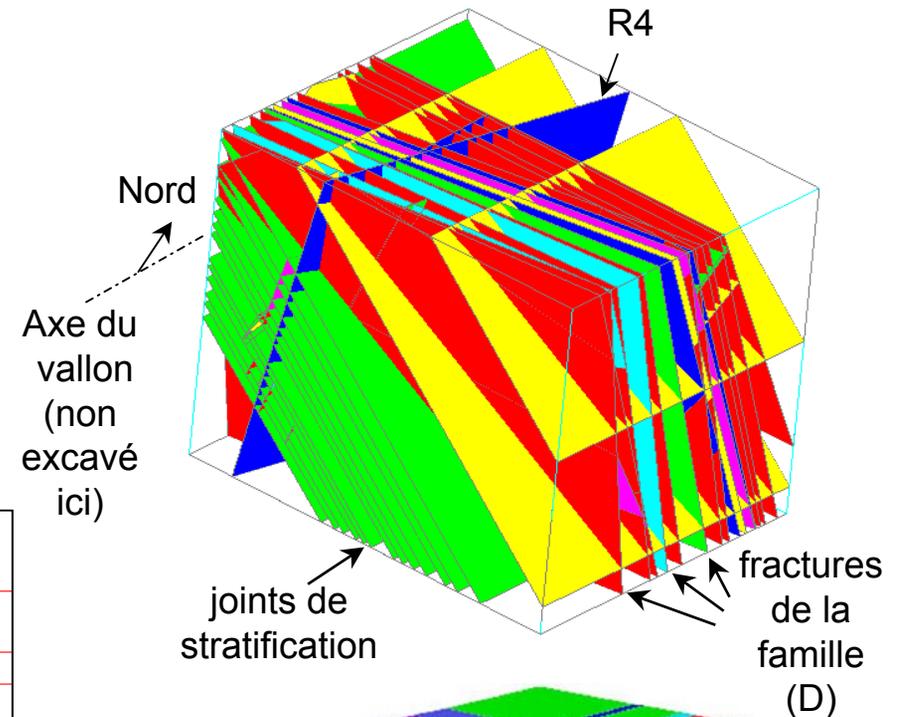
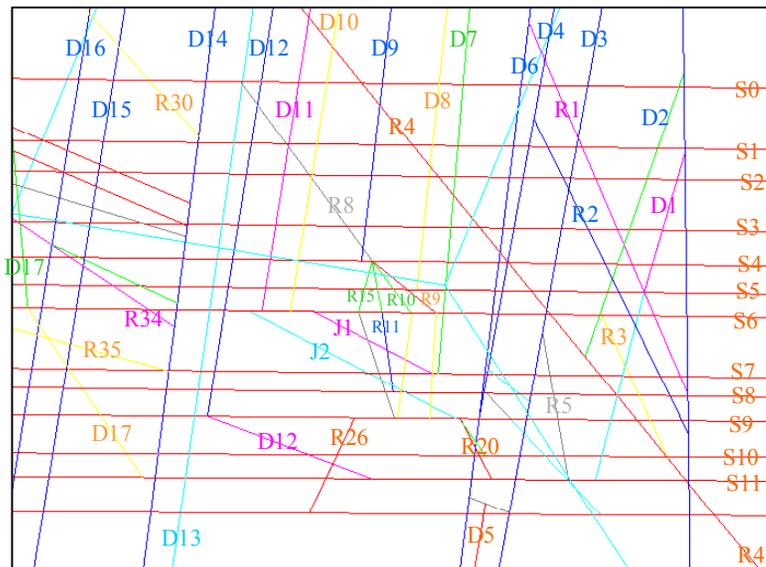
$U_n = f(\text{temps})$



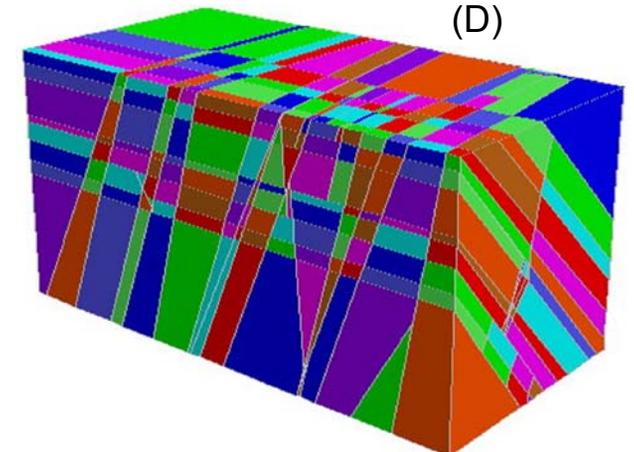
Réalisation d'un modèle géométrique 3D du site

- ✓ Utilisation du [code RESOBLOK](#)
- ✓ [Modèle à grande échelle](#) du site de Coaraze (cube d'environ 40 m de côté)
- ✓ [Validation du modèle géométrique](#)

Coupe du modèle RESOBLOK parallèle à l'orientation moyenne du versant Nord-Est du vallon

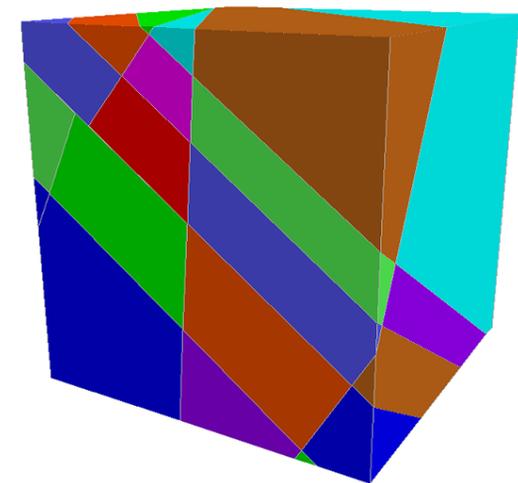
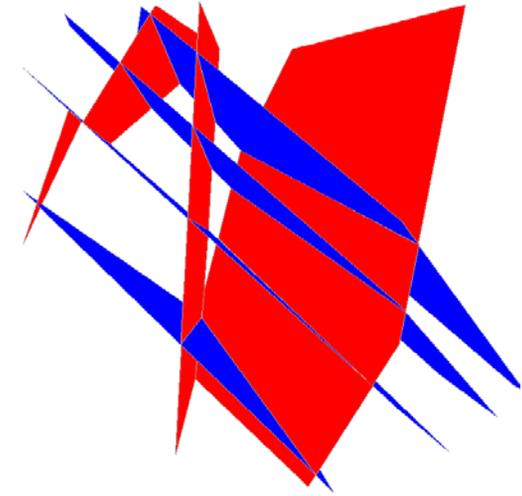
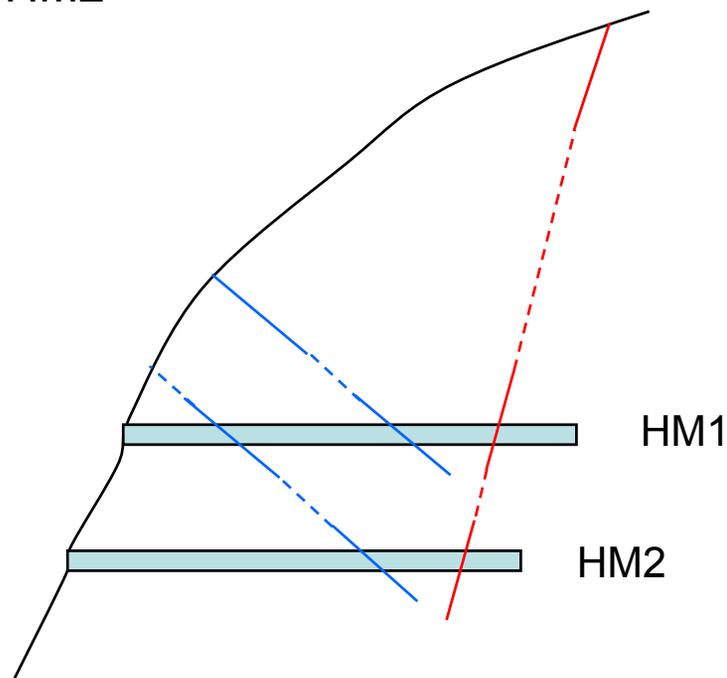


Géométrie du modèle 3DEC obtenue à partir du modèle géométrique RESOBLOK



Modèle plus petit et plus précis autour du point d'injection

- ✓ Utilisation, en plus des données précédentes, des relevés de fracturation dans les sondages HM1 et HM2



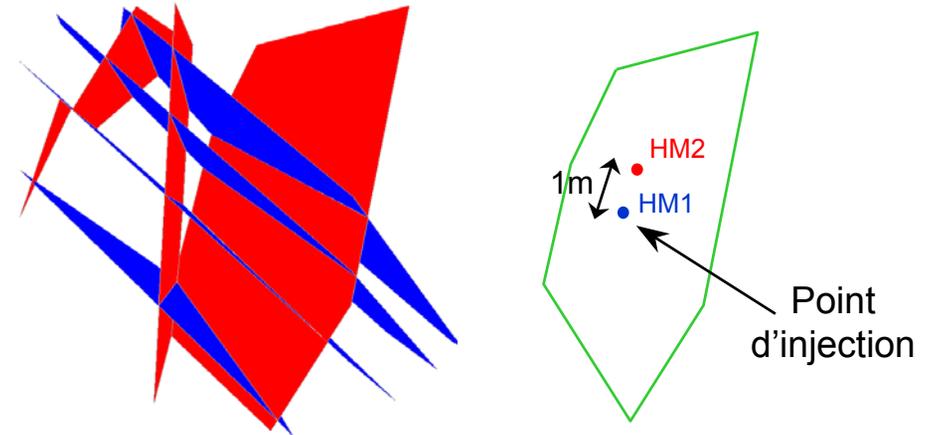
Interprétation des mesures par modélisation (3DEC)

Hypothèses du modèle de référence :

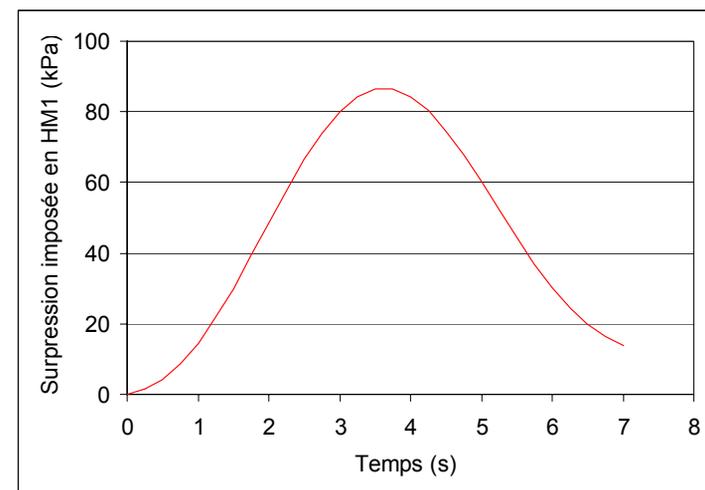
- géométrie : réseau de fractures planes
- comportement matrice : élastique, imperméable
- comportement fracture : élastique :
 $k_n = 15 \text{ GPa/m}$ (= valeur labo pour 0,1 MPa)
- loi d'écoulement : loi cubique
- $a = a_0 + \Delta u_n$: $a_0 = 10^{-4} \text{ m}$; 10^{-5} m (à ajuster)
fracture joint de strat.
- $\Delta \sigma'_n = \Delta \sigma_n - \Delta P$

Etat initial et conditions aux limites : estimé par un calcul préalable à grande échelle :
 $\sigma'_n (\text{HM1}) = 120 - 45 = 75 \text{ kPa}$

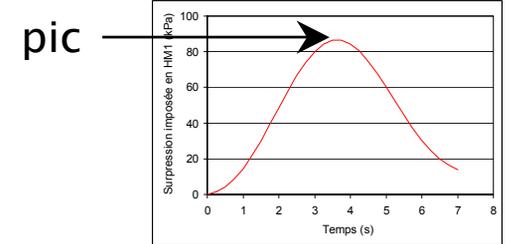
Sollicitations imposées : Chroniques de la surpression imposée au point HM1
=> simulations en régime transitoire



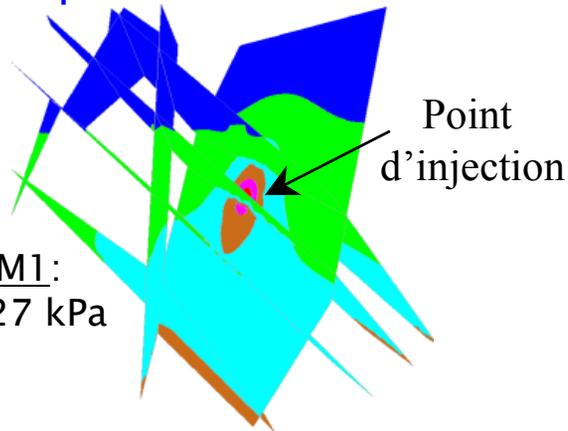
ΔP imposé en HM1



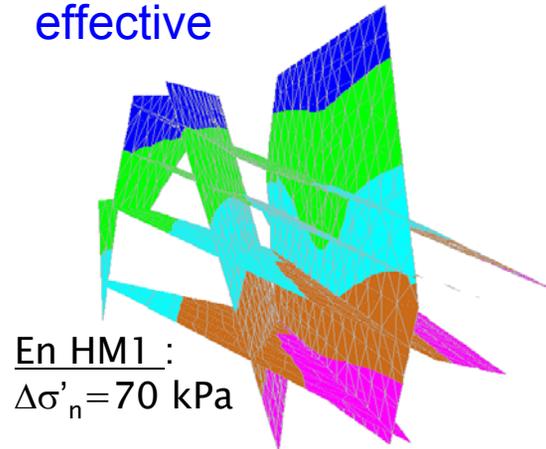
Simulation du pulse de courte durée avec 3DEC – Valeurs au pic de pression



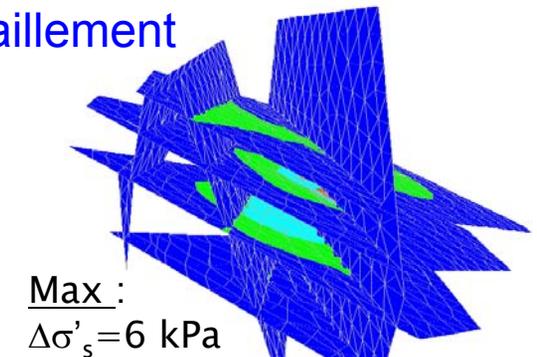
Iso- pression
hydraulique



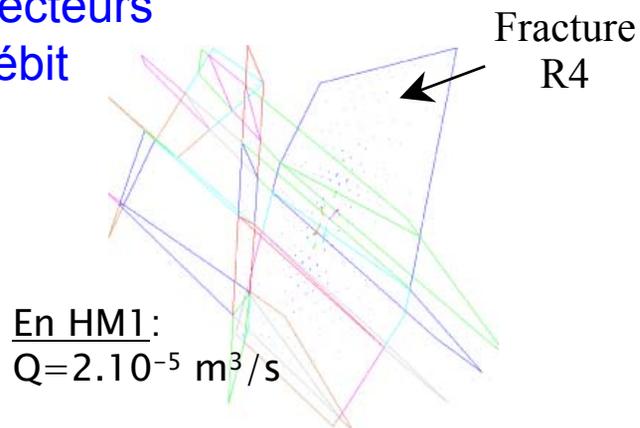
Iso-contrainte normale
effective



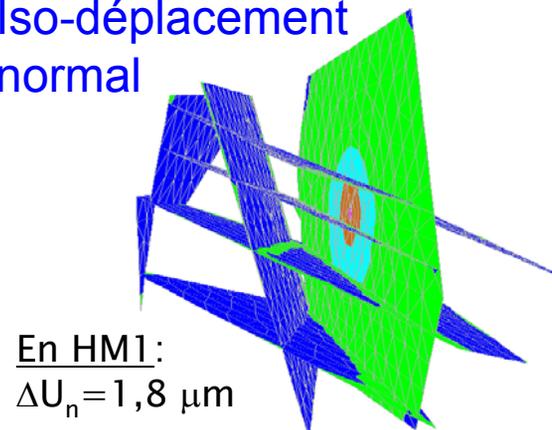
Iso- contrainte de
cisaillement



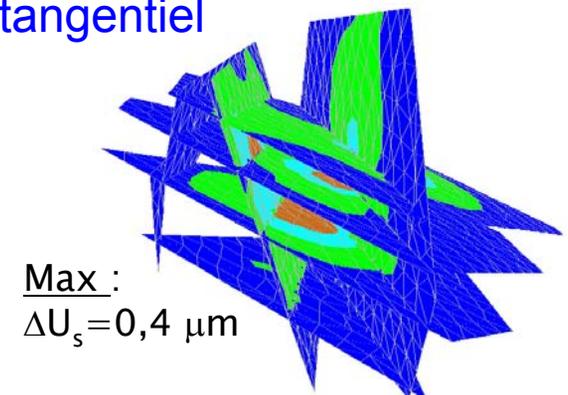
Vecteurs
débit



Iso-déplacement
normal



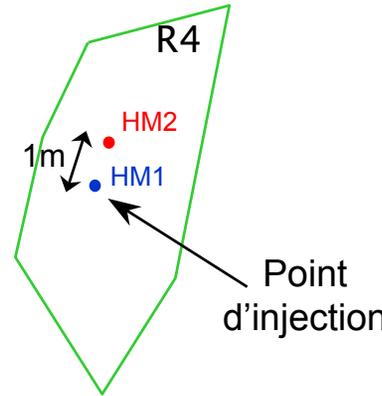
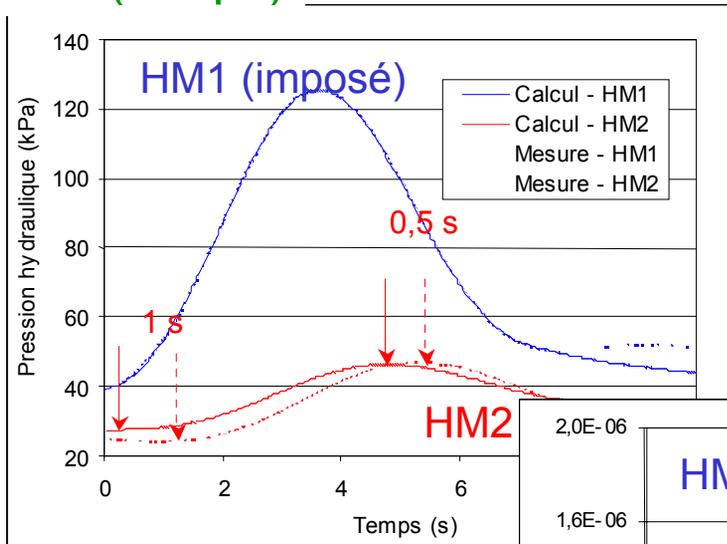
Iso- déplacement
tangentiel



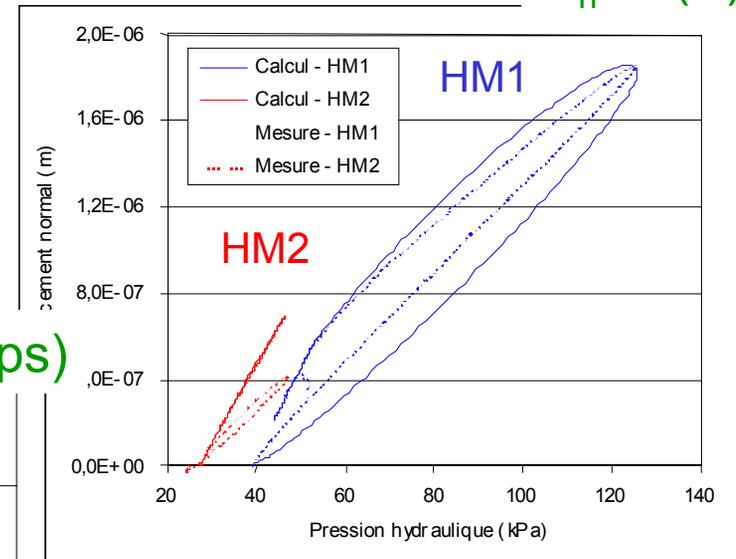
Interprétation des mesures par modélisation (3DEC)

—— Valeurs calculées - - - - - Valeurs mesurées

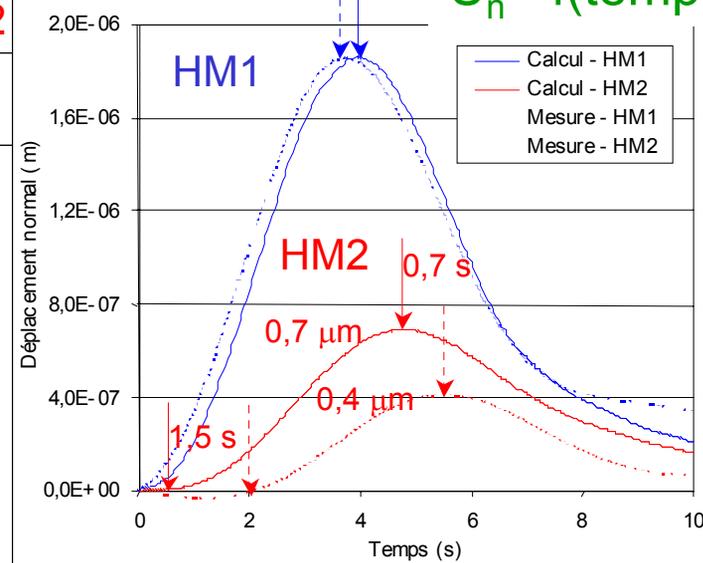
$P = f(\text{temps})$



$U_n = f(P)$



$U_n = f(\text{temps})$



✓ Résultats satisfaisants en HM1 pour le modèle de référence

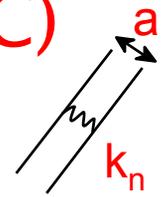
✓ Décalages temporels et d'amplitude en HM2

✓ Reproduction du dysynchronisme de U_n et P après le pic de pression

✓ Largeur boucle = $f(E, \text{fractures environnantes})$

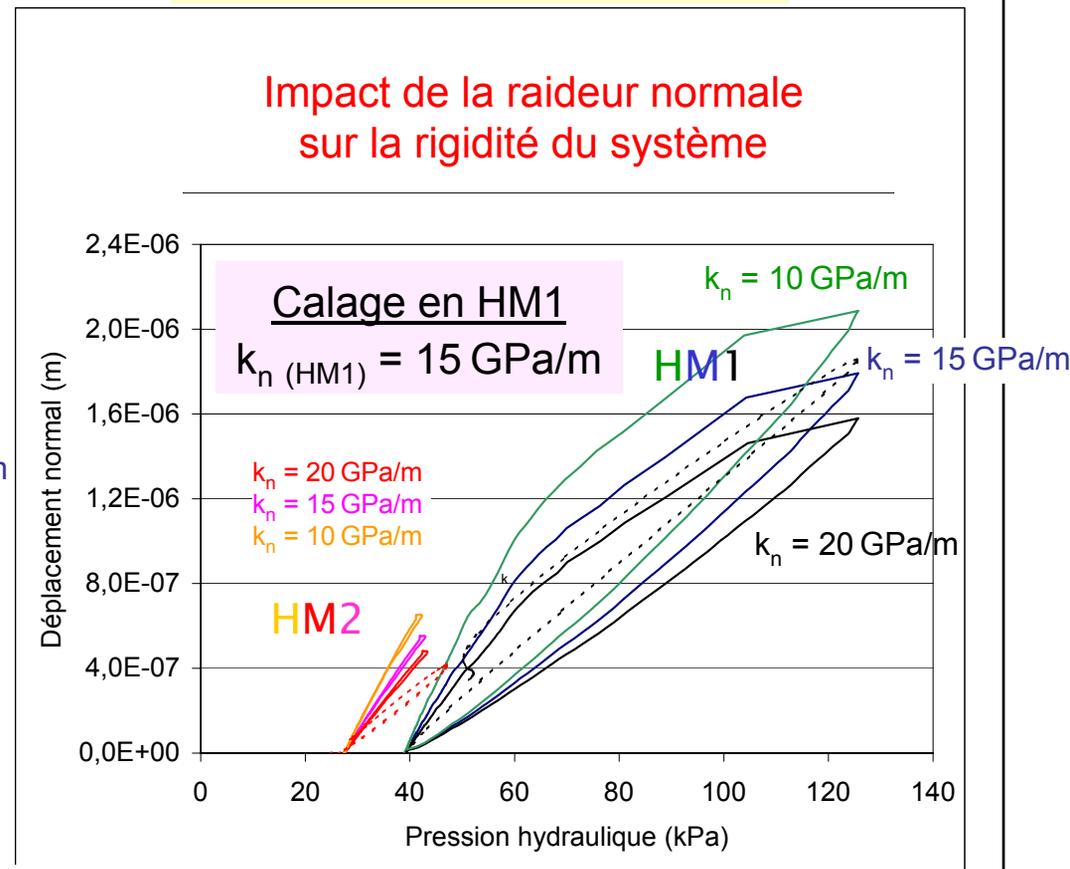
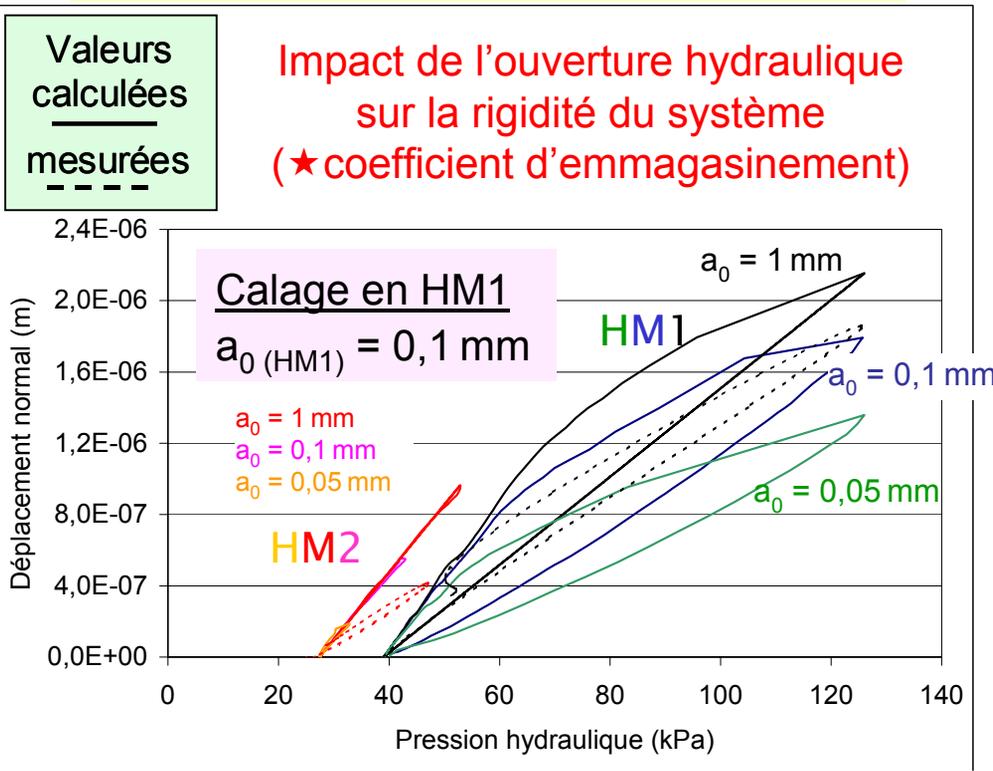
Interprétation des mesures par modélisation (3DEC)

Détermination de l'ouverture hydraulique « a » et de la raideur « k_n »
par calage de la courbe $U_n = f(P)$



Variation de la raideur normale

Variation de l'ouverture hydraulique initiale



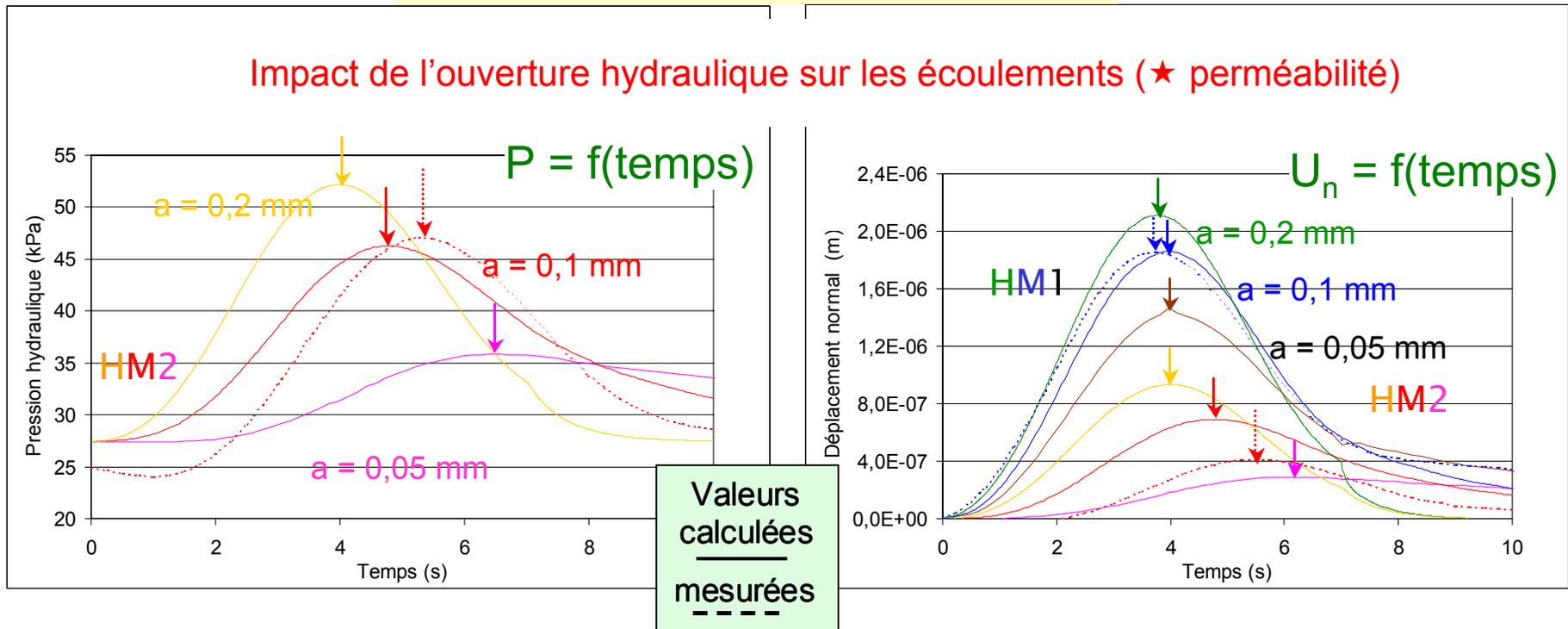
Calage en HM2 : $a_0 = 0,05 \text{ mm}$; $k_n = 50 \text{ GPa/m}$ => hétérogénéité des caractéristiques de la fracture

Interprétation des mesures par modélisation (3DEC)

Détermination de l'ouverture « a » par calage des courbes P et $U_n = f(\text{temps})$

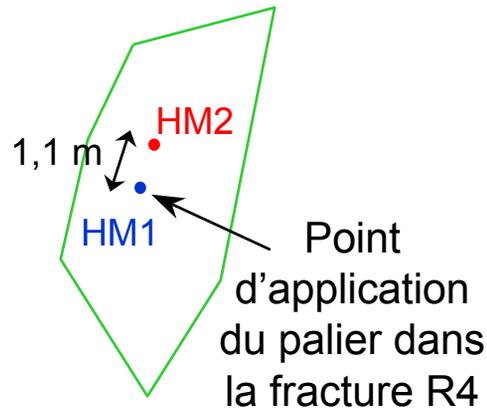
Variation de l'ouverture hydraulique initiale

Impact de l'ouverture hydraulique sur les écoulements (★ perméabilité)

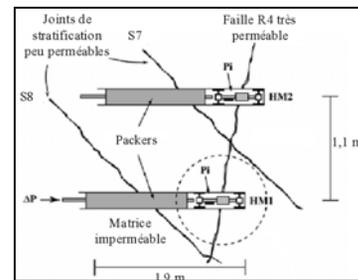


Valeur de l'ouverture hydraulique obtenue par calage : $a = 0,08 \text{ mm}$

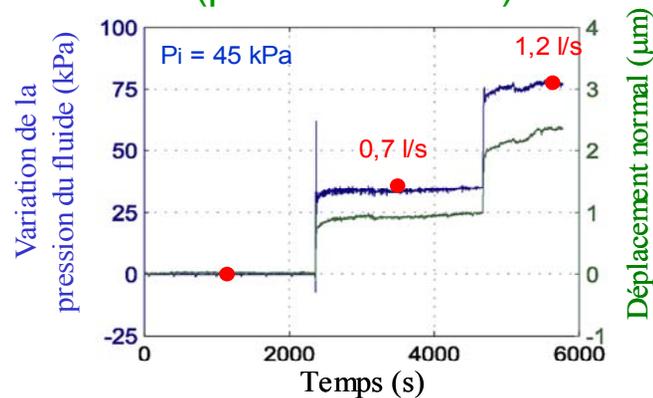
Sollicitation locale de longue durée (paliers d'injection et de pompage)



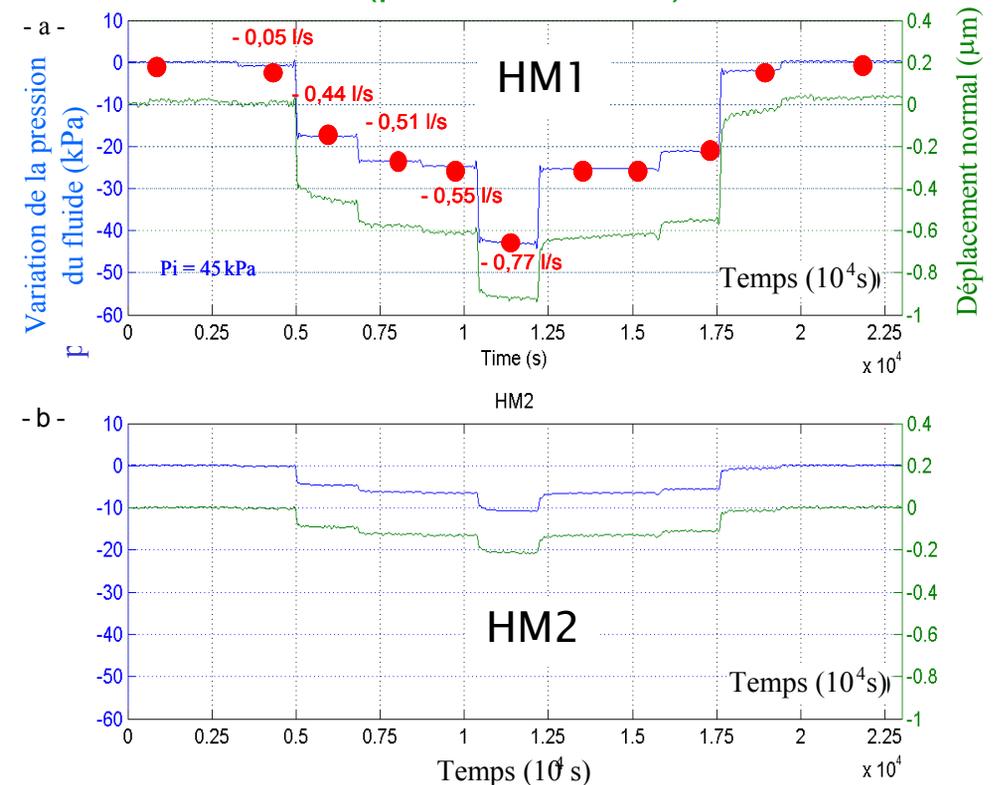
Injection (pression constante) ou pompage (débit constant) au niveau de l'intersection de la fracture R4 avec un forage



Essais d'injection à pression constante (palier de 30 mn)



Essais de pompage à débit constant (palier de 30 mn)



Interprétation des mesures par modèle analytique

Synthèse des mesures : Q , ΔP , Δu_n

Hypothèse modèle analytique :

- ✓ Effet mécanique négligeable
- ✓ Ecoulement laminaire, radial entre deux plans parallèles distants de «a» (ouverture hydraulique)

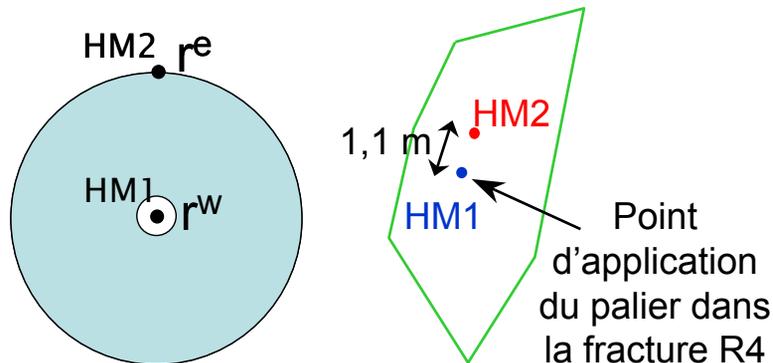
$$Q / \Delta h = C a^3$$

avec $C = 2\pi (\rho g / 12\mu) / \ln(r^e / r^w)$,

r^w : rayon du forage (0,035 m)

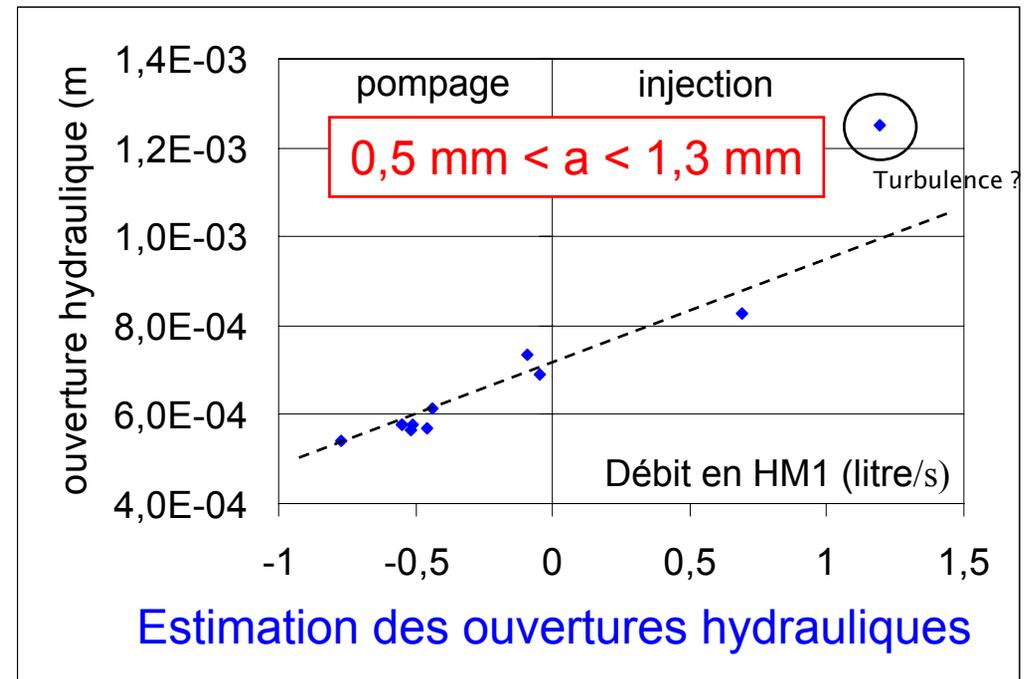
r^e : distance entre HM1 et HM2 (1,1 m)

Δh : variation de charge entre HM1 et HM2



Valeurs imposées

	débit HM1 (l/s)	ΔP_{HM1} (kPa)	Un_{HM1} (μm)	ΔP_{HM2} (kPa)	Un_{HM2} (μm)
Pompage	0	0	0	0	0
	-0,05	-1	0	0	0
	-0,44	-17	-0,46	-4,4	-0,1
	-0,51	-23,5	-0,58	-6	-0,12
	-0,55	-25	-0,62	-6,1	-0,13
	-0,77	-43	-0,9	-11	-0,21
	-0,55	-25	-0,64	-6,1	-0,12
	-0,52	-25	-0,63	-6	-0,12
	-0,46	-21,5	-0,57	-5	-0,11
	-0,09	-2	-0,04	-0,5	-0,01
Injection	0	0	0	0	
	0,69	36	1	28	pas de mesures
	1,19	78	2,35	74	



Interprétation des mesures par modélisation (3DEC)

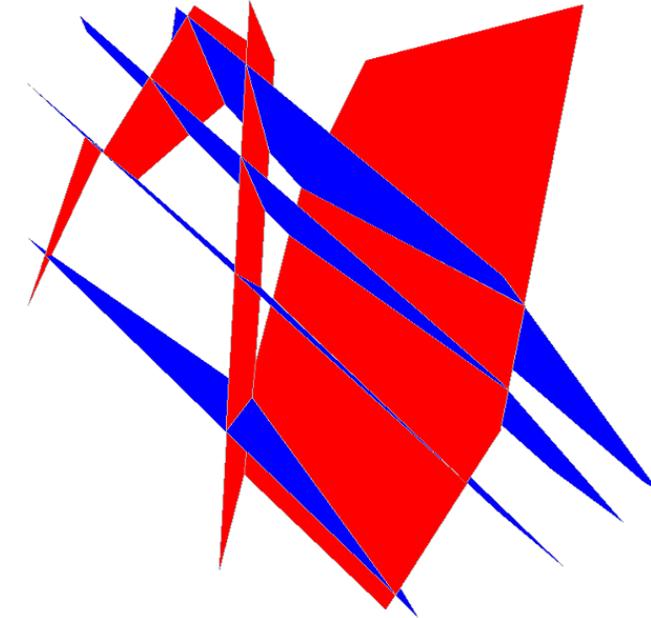
Hypothèses du modèle de référence :

- géométrie : réseau de fractures planes
- comportement matrice : élastique, imperméable
- comportement fracture : élastique :
 $k_n = 15 \text{ GPa/m}$ (= valeur labo pour 0,1 MPa)
- loi d'écoulement : loi cubique
- $a = a_0 + \Delta u_n$: $a_0 = 10^{-3} \text{ m}$; 10^{-4} m (à ajuster)
fracture joint de strat.
- $\Delta \sigma'_n = \Delta \sigma_n - \Delta P$

Etat hydraulique initial : milieu saturé ; $P = 45 \text{ kPa}$ en HM1 et 33 kPa en HM2

Etat mécanique initial : estimé par un calcul préalable à grande échelle : $\sigma'_n (\text{HM1}) = 120 - 45 = 75 \text{ kPa}$

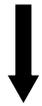
Conditions aux limites : « flux nul » en hydraulique et « contraintes imposées » en mécanique



Sollicitations imposées : Succession de valeurs de pression (essais d'injection) ou de débit (essais de pompage) imposées au point d'intersection du sondage HM1 avec la fracture R4 => **succession de calculs en régime permanent**

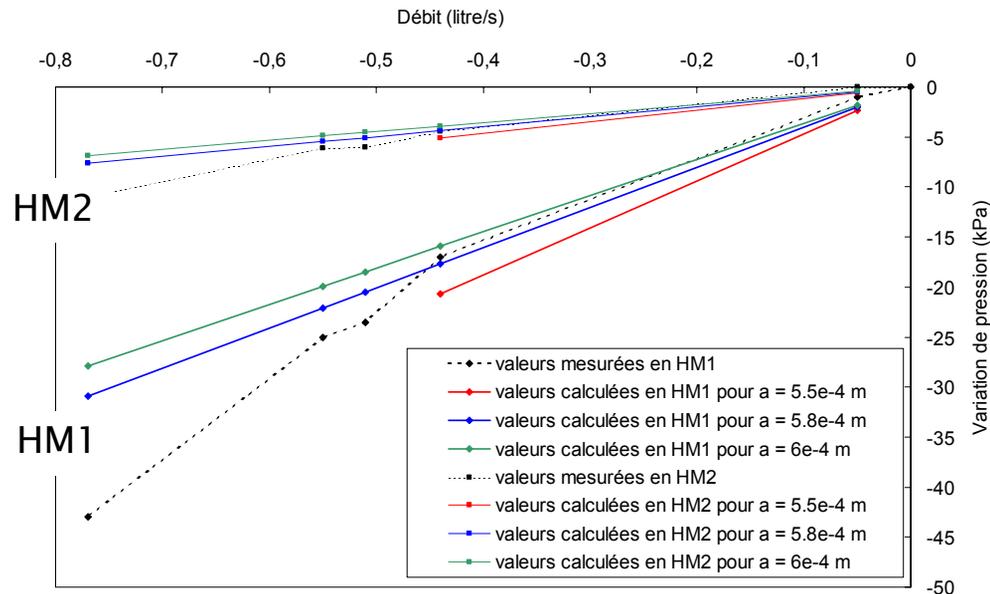
Interprétation des mesures par modélisation (3DEC)

Valeurs calculées en HM1 et HM2
pour le modèle de référence



Ajustement des paramètres
(a , k_n) par calage sur les
valeurs mesurées

	débit HM1 (l/s)	ΔP_{HM1} (kPa)	Un_{HM1} (μm)	ΔP_{HM2} (kPa)	Un_{HM2} (μm)
Pompage	0,05	-0,4	-0,01	-0,1	0,00
	0,44	-3,45	-0,08	-0,84	-0,04
	0,51	-3,99	-0,09	-0,98	-0,05
	0,55	-4,31	-0,10	-1,05	-0,05
	0,77	-6,02	-0,14	-1,47	-0,07
	0,55	-4,31	-0,10	-1,06	-0,05
	0,52	-4,07	-0,09	-1	-0,05
	0,46	-3,61	-0,08	-0,88	-0,04
	0,09	-0,72	-0,02	-0,18	-0,01
Injection	-4,656	36,25	0,8317	8,88	0,4346
	-10,06	78,25	1,793	19,21	0,9362



Valeur de l'ouverture hydraulique :
✓ $a = 0,6 \text{ mm}$ ($0,5 \text{ mm} < a < 1,3 \text{ mm}$)

Valeur de la raideur normale :
✓ $k_n = 5 \text{ GPa/m}$

Synthèse

- ✓ **Expérimentation n°1 : sollicitation globale par fermeture de la vanne**
 - mesures : extensomètre à corde vibrante, manomètre
 - interprétation (modèle 2D non-saturé) : validité de la relation de Terzaghi « $\Delta\sigma'_n = \Delta\sigma_n - \Delta P$ » pour les fractures ($a = 0,5 \text{ mm}$; $k_n = 7 \text{ GPa/m}$) ; nécessité de la reformuler pour expliquer les mesures faites sur les joints de stratification
- ✓ **Expérimentation n°2 : sollicitation locale de courte durée (pulse-test)**
 - mesures : sonde amovible avec capteurs à fibre optique
 - interprétation (modèle 3D saturé, régime transitoire) :
 - Calage sur $Un=f(P)$: $a = 0,1 \text{ mm}$, $k_n = 15 \text{ GPa/m}$ en HM1 (\neq en HM2, hétérogénéité)
 - Calage sur $P=f(t)$ et $Un=f(t)$: loi cubique $\Rightarrow a = 0,08 \text{ mm}$
- ✓ **Expérimentation n°3 : sollicitation locale de longue durée par palier**
 - mesures : sonde amovible avec capteurs à fibre optique
 - interprétation (modèle analytique) : $0,5 \text{ mm} < a < 1,3 \text{ mm}$
 - interprétation (modèle 3D saturé, régime permanent) : $a = 0,6 \text{ mm}$; $k_n = 3 \text{ GPa/m}$
- ✓ **A partir d'essais de laboratoire (pour $\sigma_n = 0,5 \text{ MPa}$) : $a = 0,06 \text{ mm}$; $k_n = 15 \text{ GPa/m}$**