

Caractérisation hydromécanique des fractures *in situ* par une nouvelle sonde d'auscultation et des simulations numériques 3D

A. THORAVAL

INERIS, École supérieure
des mines de Nancy
Parc de Saurupt
54042 Nancy Cedex
alain.thoraval@ineris.fr

Y. GUGLIELMI

Laboratoire de Géologie
des réservoirs carbonatés
Université de Provence
3, place Victor-Hugo
Case 67
13331 Marseille Cedex 3
yves.guglielmi@univ-provence.fr

F. CAPPA

Géoscience-Azur
Bât. 4
250, rue Albert-Einstein
Les Lucioles 1
Sophia-Antipolis
06560 Valbonne
Yves.Guglielmi@geoazur.
unice.fr
cappa@geoazur.unice.fr

Résumé

Un dispositif amovible d'auscultation *in situ* du comportement hydromécanique des fractures permettant la réalisation de mesures simultanées de pression et de déplacement a été mis au point. Les mesures sont réalisées à l'aide de capteurs à fibre optique qui se révèlent être d'un ordre de grandeur plus précis que les mesures par capteurs à cordes vibrantes. La fréquence des mesures est également bien supérieure (120 Hz), ce qui permet d'enregistrer avec beaucoup plus de finesse les variations temporelles des paramètres mesurés. Ce dispositif a été testé sur le site expérimental de Coaraze, petit massif calcaire fracturé situé dans le Sud-Est de la France. Les expérimentations ont consisté à injecter ou pomper un certain volume d'eau (en contrôlant la pression ou le débit) au niveau de l'intersection d'un forage et de la faille que l'on souhaite caractériser. Le dispositif instrumental s'est révélé pertinent pour caractériser *in situ* le comportement hydromécanique des fractures. Les simulations hydromécaniques ont permis de reproduire correctement les expérimentations et de déterminer par calage les caractéristiques hydromécaniques des fractures (raideur normale, ouverture hydraulique).

Mots-clés : couplage hydromécanique, fracture, caractérisation, mesure *in situ*, essai d'injection, modélisations numériques, éléments distincts, écoulement, déformation, 3DEC.

In situ hydromechanical characterization of fractures using a new sounding probe and 3D numerical simulations

Abstract

A removable device allowing the *in situ* fracture monitoring through the realization of simultaneous measurements of pressure and mechanical displacement was developed. Measurements are carried out using fiber optic sensors that prove to be of one order of magnitude more accurate than conventional measurements with vibrating wire sensors. The higher frequency of measurements (120 Hz) makes it possible to record with much more accuracy the temporal variations of the measured parameters. This device was used at the Coaraze Laboratory site, a small calcareous fractured rock mass located in southerneast France. The experiments consisted in injection and pumping of water volumes (while controlling the hydraulic pressure or the flowrate) at the intersection between a horizontal borehole and the studied fault. The instrumental device proved to be relevant to *in situ* characterize the fracture hydromechanical behavior. Numerical simulations made possible to correctly reproduce the *in situ* experiments and to determine the hydraulic and mechanical characteristics of the fractures (normal stiffness, hydraulic aperture).

Key words: hydromechanical couplings, fractures, characterization, *in situ* measurements, pulse test, numerical modelling, distinct elements, flow, deformation, 3DEC.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 01/03/2010.

Introduction

La prévision à long terme du comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés relève encore du domaine de la recherche. Celle-ci, motivée par des enjeux liés à la sécurité des personnes et des biens et la protection de l'environnement, a de nombreuses applications. En effet, la stabilité de fronts rocheux, l'étanchéité de stockages souterrains (d'hydrocarbures, de déchets radioactifs et de déchets industriels, de gaz à effet de serre), l'efficacité du concept de géothermie et la gestion de réservoirs pétroliers, les risques de migration des polluants, sont autant de domaines très affectés par les couplages hydromécaniques en milieux fracturés.

Dans le cadre d'un programme de recherche financé sur le Budget civil de recherche et développement (BCRD), l'INERIS a développé en partenariat avec le laboratoire Géoscience-Azur de l'université de Nice Sophia-Antipolis une méthode de caractérisation des milieux fracturés fondée sur une amélioration conjointe de la qualité des mesures *in situ* et des méthodes d'interprétation.

Amélioration des techniques de mesure *in situ*

Description du comportement hydromécanique des milieux fracturés

Le comportement mécanique, hydraulique et hydromécanique des fractures a été ces trente dernières années abondamment étudié. Une synthèse de l'état de l'art réalisée par Gentier (2002) souligne notamment les liens entre paramètres géométriques (rugosité des épontes et répartition des zones en contact et des vides), paramètres mécaniques (raideurs normale et tangentielle), paramètres hydrauliques (ouverture hydraulique) et les sollicitations appliquées (contrainte mécanique et pression hydraulique).

L'étude du comportement mécanique d'une fracture sous sollicitation normale met en particulier en évidence l'augmentation de sa raideur normale avec la surface de contact de ses deux épontes. D'autres auteurs ont mis en évidence le lien entre la conductivité hydraulique de la fracture et la répartition des vides entre les deux épontes.

Le couplage hydromécanique dans les fractures se définit classiquement par deux relations :

– l'une entre la pression et les contraintes normales mécaniques totales et effectives :

$$\Delta\sigma'_n = \Delta\sigma_n - b.\Delta P \quad (1)$$

– l'autre entre les variations de fermeture mécanique Δu_n et d'ouverture hydraulique Δa :

$$\Delta a = f.\Delta u_n \quad (2)$$

où b et f sont des paramètres liés à la géométrie des vides permettant l'écoulement (b et f pouvant varier avec la sollicitation appliquée sur la fracture).

Limites de la caractérisation en laboratoire

Les travaux de laboratoire sont très utiles pour comprendre la complexité des relations entre les différents paramètres définissant le comportement hydromécanique des fractures. Toutefois, une identification de ces paramètres à partir d'essais de laboratoire faits sur échantillons de taille nécessairement réduite n'est pas forcément représentative du comportement de la fracture à l'échelle du site étudié. Cela est lié aux ondulations métriques de la fracture, à des dissolutions karstiques locales et aux interactions complexes avec des fractures ou des hétérogénéités environnant la fracture testée qui ne sont pas vues à l'échelle de l'échantillon. Il est donc important de compléter la caractérisation au laboratoire par une caractérisation à plus grande échelle réalisée *in situ*.

Limite des caractérisations classiques faites *in situ*

L'essai d'injection ou pulse-test est fréquemment utilisé pour déterminer la conductivité ou l'ouverture hydraulique des fractures. Ce test est réalisé le plus souvent en milieu saturé et consiste, dans le cas d'un milieu fracturé, à injecter un faible volume de fluide dans une fracture afin de créer un pic de pression rapide dans celle-ci. Le fluide s'écoule dans le milieu, et la pression diminue dans le temps en fonction de la conductivité hydraulique de la fracture.

Traditionnellement, les résultats du pulse-test sont interprétés en considérant un comportement hydraulique linéaire. Cependant, ces modèles restent souvent imprécis et ne rendent pas compte des effets non linéaires largement observés dans le cas des formations à forte conductivité hydraulique. Dans la plupart des cas, les modèles employés ne prennent pas non plus en compte l'impact des couplages hydromécaniques sur la mesure.

Une nouvelle méthode de caractérisation hydromécanique des fractures *in situ*

Un dispositif amovible d'auscultation *in situ* du comportement hydromécanique des fractures permettant la réalisation de mesures simultanées de pression et de déplacement a été mis au point par Géoscience Azur (Cappa *et al.*, 2006a).

Comme le montre la figure 1, cette sonde amovible est composée d'un assemblage de plusieurs constituants : deux obturateurs pneumatiques ; deux ancrages mécaniques ; un capteur de pression et un capteur de déplacement à fibre optique basés sur le principe de Fabry-Pérot. Elle permet la mesure synchrone de la pression d'eau dans la fracture et du déplacement normal de ses épontes.

Les deux obturateurs hydrauliques délimitent une chambre d'injection d'eau de 0,5 à 2 m de long. Dans cette chambre, le système central est composé d'un capteur de déplacement installé entre deux ancrages mécaniques indépendants des obturateurs (Fig. 2). Un

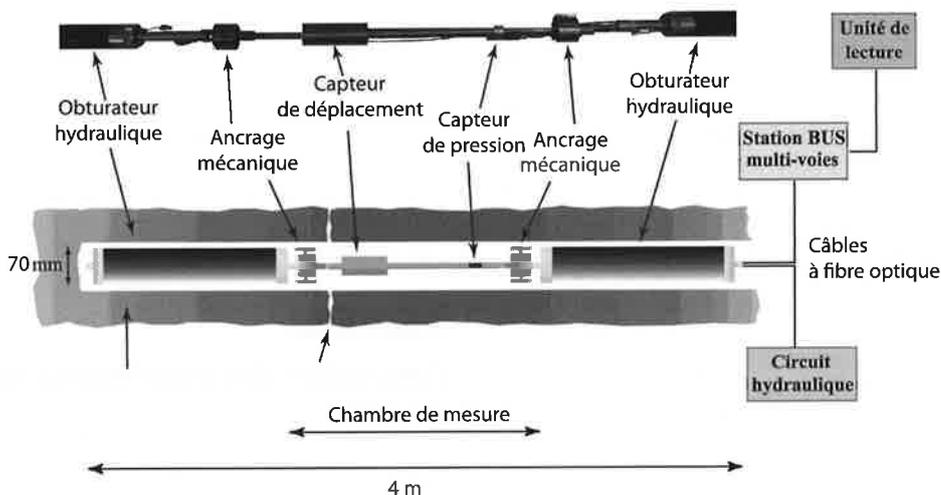
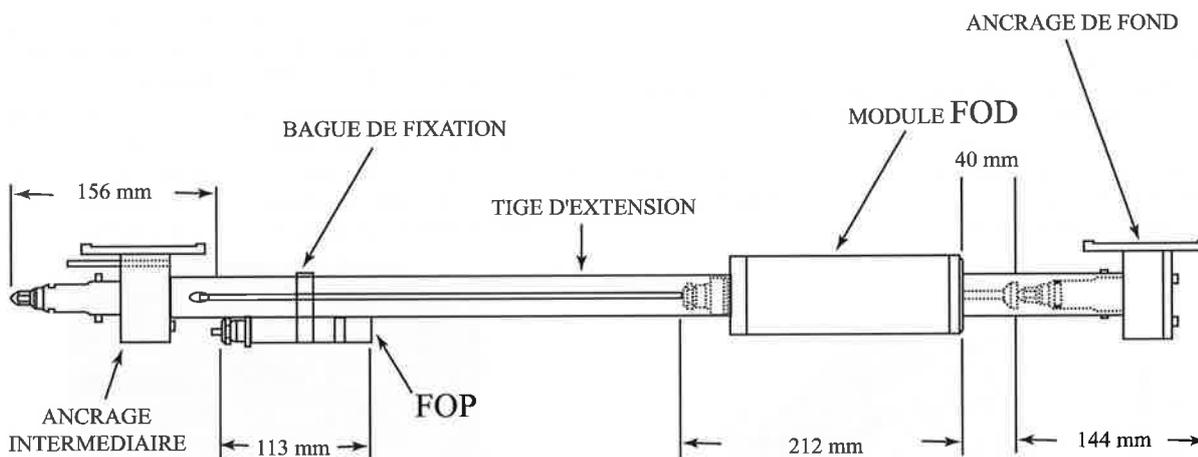


FIG. 1 Premier prototype de la sonde de mesures couplées hydromécaniques.
First prototype of the hydro-mechanical coupled measurement probe.



FOD : capteurs de déplacement à fibre optique
FOP : capteurs de pression interstitielle à fibre optique

FIG. 2 Détail du système central de mesures (intérieur de la chambre d'injection).
Detail of the central part of the probe (interior of the injection chamber).

capteur de pression est disposé sur un tube d'extension de longueur ajustable en fonction de la longueur de chambre voulue.

Les capteurs à fibre optique utilisés se révèlent être d'un ordre de grandeur plus précis que les capteurs par cordes vibrantes (soit 10^{-7} m pour les déplacements et 1 kPa pour les mesures de pression). De plus, la fréquence des mesures peut être bien supérieure (fréquence d'échantillonnage de 120 Hz), ce qui permet d'enregistrer avec beaucoup plus de finesse les variations temporelles des paramètres mesurés.

3

Application au site de Coaraze

3.1

Description du site

Les expérimentations *in situ* ont été conduites sur le site laboratoire de Coaraze en France. Ce site est un petit réservoir rocheux fracturé (30 m × 30 m)

37

composé d'une série de calcaires fracturés (d'âge Crétacé inférieur) de 15 m d'épaisseur (Fig. 3). Les limites hydrauliques du réservoir sont bien contraintes avec des niveaux géologiques imperméables à la base et au sommet, une faille imperméable située en aval (vers le sud-ouest du site), et une surface topographique artificiellement imperméabilisée sur une dizaine de mètres de hauteur. En amont (vers le nord-est du site), une faille perméable permet à l'eau de s'écouler continuellement dans le réservoir. La masse rocheuse est naturellement drainée par une source située dans l'angle sud-ouest du site (Fig. 3). Pour les expérimentations, la source a été artificiellement fermée avec une vanne dans le but de contrôler la pression dans le réservoir (par ouverture et fermeture de la vanne).

3.2

Fracturation à l'échelle du site expérimental

Les études préalables réalisées sur le site par Guglielmi (1999) et Fénart *et al.* (2001) ont montré que le réseau de fractures du site de Coaraze est constitué de trois familles principales de discontinuités, dont l'orientation est donnée ici en convention « direction de plan, plongement, sens du pendage » :

- les joints de stratification (Si) de direction N25 à N50 avec un pendage de 45E ;
- des failles (Fi, i : 1 à 10) de direction N140 avec un pendage de 75NE qui contiennent des zones de brèche de 4 à 5 cm d'épaisseur, souvent karstifiées ;
- des failles (Fi, i : 11 à 14) de direction N50 à N90 avec un pendage de 70 à 80SE (donc quasiment parallèles au versant instrumenté du site), qui présentent les plus grands chenaux karstiques.

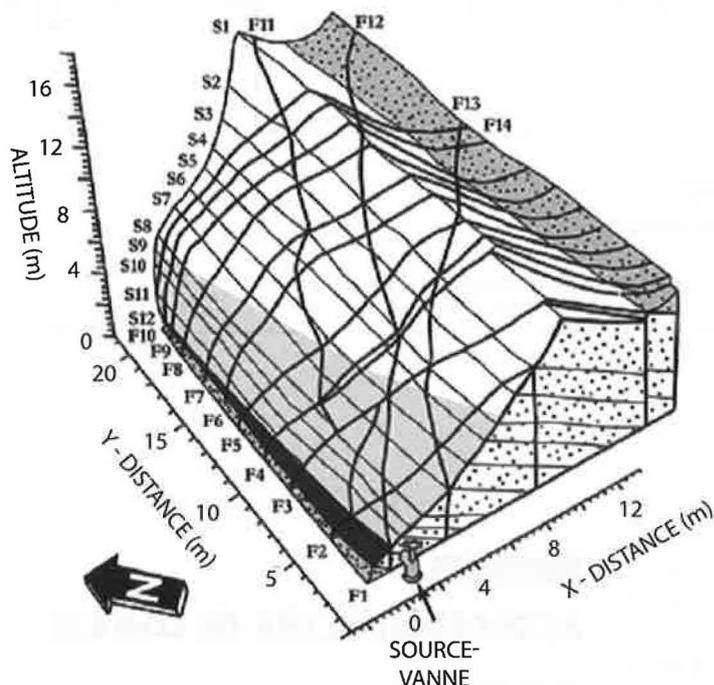


FIG. 3

Vue 3D du site de Coaraze et contexte hydrogéologique du massif rocheux fracturé.

Three-dimensional view of the Coaraze site and hydro-geological context of the fractured rock-mass.

Des relevés complémentaires ont été réalisés à l'aide d'un tachéomètre haute précision dans le but de simuler avec un maximum de précision la géométrie du site. Le principe de la mesure consiste à positionner le tachéomètre face au versant rocheux étudié et à mesurer les coordonnées de points positionnés sur les traces visibles des fractures sur le versant. Un traitement de ces mesures tachéométriques permet de déterminer l'orientation et la position des différentes fractures.

3.3

Description des expérimentations réalisées

Deux types d'expérimentations ont été effectués pour étudier, d'une part, le comportement hydromécanique global du massif fracturé, et pour caractériser, d'autre part, les fractures individuellement en les sollicitant localement par injection ou par pompage.

Le premier type d'expérimentations consiste à imposer une sollicitation globale du massif par fermeture d'une vanne installée sur la source de la Parre. Quand la vanne est fermée, l'eau monte assez rapidement dans les fractures du massif sur une hauteur d'environ 10 m (du fait de l'imperméabilisation de la partie basse du versant). L'ouverture et la fermeture de la vanne permettent de contrôler le niveau de pression de l'eau dans les fractures. Les résultats de cette expérimentation ont été décrits dans Guglielmi (1999) et Cappa *et al.* (2005).

Les expérimentations locales, que l'on va décrire plus précisément ici, ont consisté à utiliser la sonde amovible d'auscultation et à imposer une pression ou un débit dans une fracture et à mesurer les variations des pressions hydrauliques et des déplacements nor-



- Fi — F1 à F14 - Failles
- Si — S1 à S12 - Joints de stratification
- Calcaire
- ▨ Niveau imperméable
- ▩ Faille imperméable
- ▧ Zone artificiellement saturée
- Zone naturellement saturée

maux au plan de fracture induits par la sollicitation (Fig. 4). Cela a nécessité la réalisation préalable de deux forages horizontaux, espacés de 1,1 m, recoupant la fracture choisie. On distingue des injections de courte durée (pulse-test) et des essais de pompage et d'injection de plus longue durée. Les injections et les pompages d'eau sont réalisés avec une pompe à membrane connectée par un train de tiges à la chambre. Cette pompe peut imposer des variations de pression allant de 0 à 0,7 MPa. Toutes ces expérimentations ont été

réalisées en condition hydraulique saturée (correspondant à l'état d'équilibre du site à vanne fermée).

3.3.1

Description des expérimentations de courte durée

Pour une injection de courte durée (pulse-test) imposée en HM_1 , la figure 5 montre la variation au cours du temps de la pression hydraulique dans la frac-

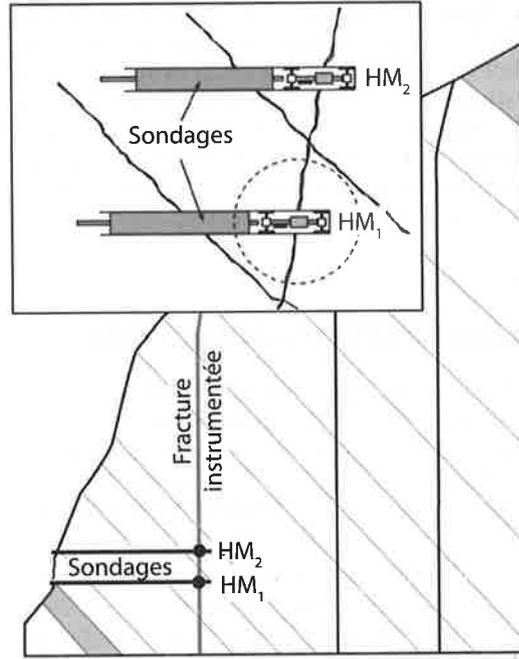


FIG. 4 Dispositif d'injection et de pompage utilisé pour la sollicitation localisée d'une fracture particulière. - Coupe transversale au talus rocheux. Injection and pumping device used to impose local hydraulic loading inside a particular fracture. Cross-section through the rock slope.

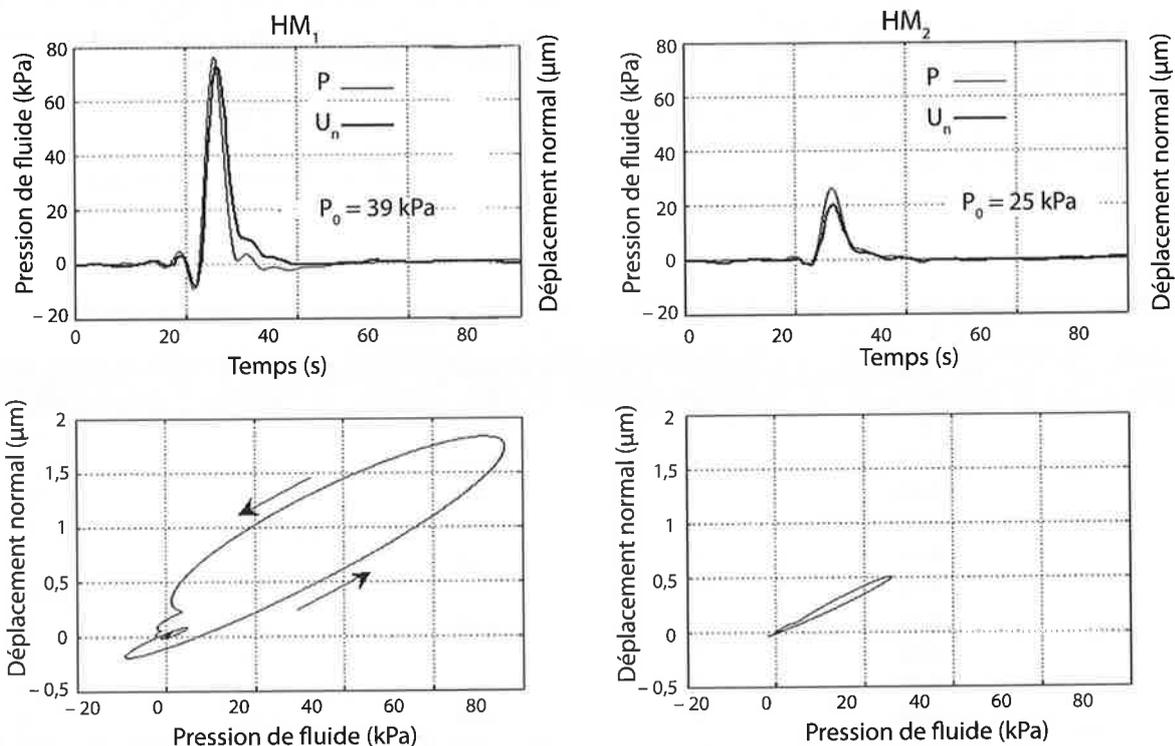


FIG. 5 Variations de pression de fluide et de déplacement normal en HM_1 et HM_2 pour une injection de courte durée (pulse-test) imposée en HM_1 . Fluid pressure and normal displacement variations at HM_1 and HM_2 induced by a pulse-test at HM_1 .

Interprétation des expérimentations

4.1

Utilisation d'un modèle analytique négligeant les effets mécaniques

Le modèle analytique suppose que l'écoulement dans la fracture instrumentée se produit entre deux plans parallèles distants de « a » (ouverture hydraulique), qu'il est laminaire et radial à partir du point d'injection. Pour ce type d'interprétation, n'ayant en général pas d'autres informations que celles mesurées au point sollicité, on est souvent amené à faire l'hypothèse d'une certaine distance d'influence à partir de laquelle la perturbation n'a plus d'effet. Cette distance étant difficile à évaluer, cette hypothèse conduit à des imprécisions sur les résultats. Dans notre cas, on dispose d'informations complémentaires, puisque l'on a mesuré également les variations de la pression hydraulique en un point de la fracture HM₂ localisé à une distance r_e = 1,1 m de HM₁. Dans ce cas, on peut écrire (Rutqvist, 1995) :

$$\frac{Q}{\Delta h} = Ca^3 \quad (3)$$

où Q est le débit au point sollicité (HM₁) ; $C = 2\pi \left(\frac{\rho g}{12\mu} \right) \ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right)$, avec r_w le rayon du forage (r_w = 0,035 m),

g est la gravité, ρ la masse volumique et μ la viscosité dynamique du fluide ; Δh désigne la variation de charge entre le point sollicité (HM₁) et le point extérieur (HM₂), soit $\Delta h = [(P^f_{HM1} - P^i_{HM1}) - (P^f_{HM2} - P^i_{HM2})]/(\rho g)$.

En représentant la variation de [(P^f_{HM1} - Pⁱ_{HM1}) - (P^f_{HM2} - Pⁱ_{HM2})] en fonction du débit Q injecté en HM₁, on a constaté que la relation entre Q et Δh est quasiment linéaire pour les pompages, mais ne l'est plus pour les injections. La valeur de l'ouverture hydraulique peut être estimée en écrivant :

$$a = \left(\frac{Q \frac{6\mu}{\pi} \ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right)}{[(P^f_{HM1} - P^i_{HM1}) - (P^f_{HM2} - P^i_{HM2})]} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

ture instrumentée au niveau de son intersection avec les forages (notée HM₁ et HM₂), ainsi que du déplacement normal associé. La valeur maximale de la pression indiquée correspond à une variation de pression par rapport à la valeur initiale (39 kPa en HM₁, 25 kPa en HM₂). Le maximum de pression est atteint en HM₂ avec un décalage temporel de 1,3 s.

Le déplacement normal induit est synchrone en HM₁ pendant la phase d'application de la surpression (jusqu'au pic). Après le pic, la pression diminue pour retrouver au bout d'environ 20 secondes sa valeur initiale. On note que le déplacement normal diminue moins rapidement en HM₁ du fait de la diffusion de la surpression dans la fracture. Cela est nettement mis en évidence en représentant l'évolution du déplacement normal avec la pression hydraulique (Fig. 5). Cette diachronie s'atténue lorsque l'on s'écarte du point d'injection, comme le montre le résultat en HM₂.

3.3.2

Description des expérimentations de longue durée

Il s'agit de pompage par palier à débit constant ou d'injection par palier à pression constante. Chaque palier dure de 30 minutes à 1 heure. Les mesures obtenues (à chaque palier) en HM₁ et HM₂ sont rassemblées dans le tableau I (les valeurs imposées sont en gras).

Le pompage induit des variations de la pression hydraulique et du déplacement normal en HM₁ et HM₂. Il apparaît qu'il est nécessaire d'imposer un débit de pompage de 0,77 litre/s pour que la pression s'annule en HM₁. Le pompage génère par ailleurs des déplacements normaux (fermeture) maximaux de 0,9 mm en HM₁ et de 0,2 mm en HM₂.

Les pressions imposées au cours de l'injection induisent des débits injectés respectifs de 0,7 litre/s et 1,2 litre/s en HM₁ et des déplacements normaux (ouverture) de 1 mm et 2,35 mm. En HM₂, les variations de pressions mesurées à l'équilibre pour chaque palier sont respectivement de 28 kPa et 74 kPa. Un dysfonctionnement momentané des capteurs n'a pas permis de mesurer les déplacements normaux induits en HM₂.

TABLEAU I

Synthèse des mesures faites en HM₁ et HM₂ correspondant aux paliers de pompage et d'injection.
Recorded measurements at HM₁ and HM₂ for each pumping or injection steps.

	Débit HM ₁ (l/s)	ΔP _{HM1} (kPa)	U _n _{HM1} (μm)	ΔP _{HM2} (kPa)	U _n _{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	

L'application de cette formule à chaque palier de pompage ou d'injection précédente permet d'encadrer l'ouverture hydraulique de la fracture instrumentée : $0,5 \text{ mm} < a < 1,3 \text{ mm}$. On obtient des valeurs plus importantes dans le cas des essais d'injection à pression constante. Les valeurs d'ouverture hydraulique déterminées par le modèle analytique semblent donc affectées par les conditions d'essai. Ces variations de l'ouverture laissent penser que les hypothèses sur lesquelles repose cette interprétation ne sont pas totalement vérifiées. Il semble en particulier nécessaire de prendre en compte le couplage hydromécanique.

4.2

Apport de la modélisation numérique à l'interprétation des essais

La modélisation numérique des expérimentations *in situ* a nécessité préalablement la réalisation d'un modèle géométrique en grand du site à l'aide du logiciel RESOBLOK (Korini, 2000). Ce modèle a été construit de manière déterministe à partir des données de fracturation. Les 60 à 70 fractures répertoriées ont été introduites une à une, en commençant par celles qui découpent complètement la zone d'intérêt, soit en particulier celles qui appartiennent aux familles les plus régulières. Cette façon de procéder a l'avantage de définir des compartiments qui permettent de limiter l'extension des fractures secondaires. Un modèle plus petit et plus précis (cube de 8 m de côté) a également été réalisé autour de la zone d'injection pour la simulation des pulses. Il a été construit autour du point d'injection HM_1 . Il utilise, en plus des données précédentes, les relevés de fracturation dans les forages.

Pour simuler les expérimentations, on a utilisé le logiciel 3DEC qui permet la simulation du comportement hydromécanique d'une matrice déformable et imperméable découpée par des fractures supposées saturées d'eau (Itasca, 1993 ; 1994). Des travaux antérieurs réalisés par l'INERIS ont permis de vérifier le bon fonctionnement du logiciel pour des simulations hydromécaniques (Thoraval et Renaud, 2003 ; Thoraval, 2005 ; Thoraval *et al.*, 2005 ; Hosni *et al.*, 2003). Des développements ont également été réalisés à la demande de l'INERIS permettant de généraliser les lois de couplage ; les paramètres des équations (1) et (2), décrites dans le § 2.1., peuvent être définis comme des fonctions de la contrainte normale s'exerçant sur la fracture.

Le modèle considère les hypothèses suivantes :

- la matrice a un comportement élastique ;
- les fractures et les joints de stratification ont un comportement élastique linéaire, la fermeture mécanique Δu_n s'obtenant en divisant la contrainte normale effective exercée sur les épontes de la fracture par la raideur normale de la fracture. On a supposé négligeable les variations de la raideur des discontinuités induite par celles de la contrainte effective au cours des expérimentations ;
- la loi d'écoulement dans les fractures est la loi cubique ;
- les lois de couplages hydromécaniques correspondent aux équations (1) et (2) avec $b = f = 1$.

Les valeurs choisies pour les paramètres du modèle de référence sont les suivantes :

• Raideurs des fractures

La valeur $k_n = 15 \text{ GPa/m}$ a été retenue pour la raideur normale de la fracture instrumentée (valeur proche de la valeur obtenue en laboratoire à faible valeur de contrainte normale) et $k_n = 100 \text{ GPa/m}$ pour celle des joints de stratification (choix arbitraire à ajuster par calage). Les raideurs tangentielles sont supposées 10 fois plus faibles.

• Ouvertures hydrauliques des fractures

La valeur $a_0 = 10^{-4} \text{ m}$ a été choisie pour l'ouverture hydraulique de la fracture instrumentée (valeur sous l'état de contrainte et de pression initiale avant perturbation). Cette valeur est proche de celle obtenue en laboratoire sous faible contrainte normale. On a fixé par ailleurs $a_0 = 10^{-5} \text{ m}$ pour les joints de stratification.

• Pressions hydrauliques initiales

Lorsque la vanne est fermée, un état d'équilibre hydromécanique s'établit dans le versant. Le niveau d'eau remonte et se stabilise à environ 7 m (voire jusqu'à 10 m suivant la distance au versant) au-dessus de la vanne, soit environ 4 m au-dessus du point d'injection en HM_1 . Le « petit » modèle, utilisé ici pour interpréter les expérimentations réalisées avec la sonde amovible, peut donc être considéré comme initialement totalement saturé. Les pressions hydrauliques initiales imposées dans le modèle sont cohérentes avec les valeurs mesurées (45 kPa en HM_1 et 33 kPa en HM_2).

• Contraintes initiales

La répartition des contraintes initiales est plus complexe à estimer car elle dépend notamment de la géométrie du versant et de sa fracturation. Faute de mieux, on a choisi de l'estimer par un calcul préalable à grande échelle. Le traitement des résultats de ce calcul a permis de déterminer le champ de contrainte initiale en tout point du « petit » modèle comme une fonction de la position de ce point dans l'espace. La contrainte totale initiale normale à la fracture instrumentée vaut environ $\sigma_{ni} = 120 \text{ kPa}$ en HM_1 (la contrainte effective initiale en HM_1 vaudrait donc selon la relation de Terzaghi $\sigma'_{ni} = 120 - 45 = 75 \text{ kPa}$) ;

• Conditions aux limites

On a considéré des conditions aux limites de type « flux nul » en hydraulique et de type « contraintes imposées » en mécanique (les valeurs imposées étant égales aux valeurs initiales résultant du modèle à grande échelle). On a pu établir que, pour la taille choisie du petit modèle, les conditions aux limites n'avaient pas d'effet significatif sur les résultats.

4.3

Détermination des caractéristiques HM de la fracture instrumentée par calage sur les mesures faites lors des injections de courte durée

On a simulé le pulse en imposant l'évolution des pressions hydrauliques mesurées au cours du temps au point d'injection. Les simulations ont été réalisées en régime transitoire. Le temps est discrétisé en un certain nombre de pas de temps hydrauliques, un certain nombre de cycles mécaniques dits de relaxation étant effectué à chaque pas de temps hydraulique afin d'obtenir un équilibre mécanique à chaque pas hydraulique.

La figure 6 présente les isovaleurs de pression (a), les vecteurs débits (b), les isovaleurs de contrainte normale effective (c), de déplacement normal (d), de contrainte de cisaillement (e), de déplacement tangentiel (f) calculées avec 3DEC au pic de pression pour le modèle de référence. On constate que l'essentiel des variations est observé dans la fracture instrumentée, mises à part les variations de contrainte de cisaillement et de déplacement tangentiel qui affectent surtout les joints de stratification.

La figure 7 compare les évolutions mesurées et calculées des pressions hydrauliques et des déplacements normaux dans la fracture instrumentée au cours du temps au point d'injection HM_1 et en HM_2 . On observe que la pression calculée en HM_2 commence à augmenter environ 1 seconde plus tôt que ce qui est mesuré. La valeur maximale de la surpression calculée en HM_2 est inférieure de 10 % à la valeur mesurée et est atteinte environ 0,5 s plus tôt. L'amplitude des déplacements normaux calculée en HM_1 est très proche des valeurs mesurées. En HM_2 , ces déplacements sont surestimés

(0,7 μm au lieu de 0,4 μm). On note, en HM_2 , des décalages temporels : le déplacement calculé commence à augmenter environ 1,5 s plus tôt, la valeur maximale étant atteinte 0,7 s plus tôt.

Ces valeurs étant très faibles, la détermination des propriétés *in situ* par calage n'a de sens que si l'on peut garantir une précision bien inférieure aux variations mesurées. C'est le cas ici, puisque les capteurs à fibre optique garantissent une précision inférieure à $0,1 \cdot 10^{-6}$ m pour les déplacements et de 1 kPa pour les pressions hydrauliques.

La figure 8 montre l'évolution des pressions en fonction des déplacements normaux aux mêmes points. Cette représentation a l'avantage de comparer les valeurs mesurées et calculées indépendamment des décalages temporels.

On note une relative bonne corrélation entre la courbe $u_n = f(P)$ mesurée et calculée en HM_1 . On constate que le calcul reproduit qualitativement le synchronisme des mesures de déplacement et de pression

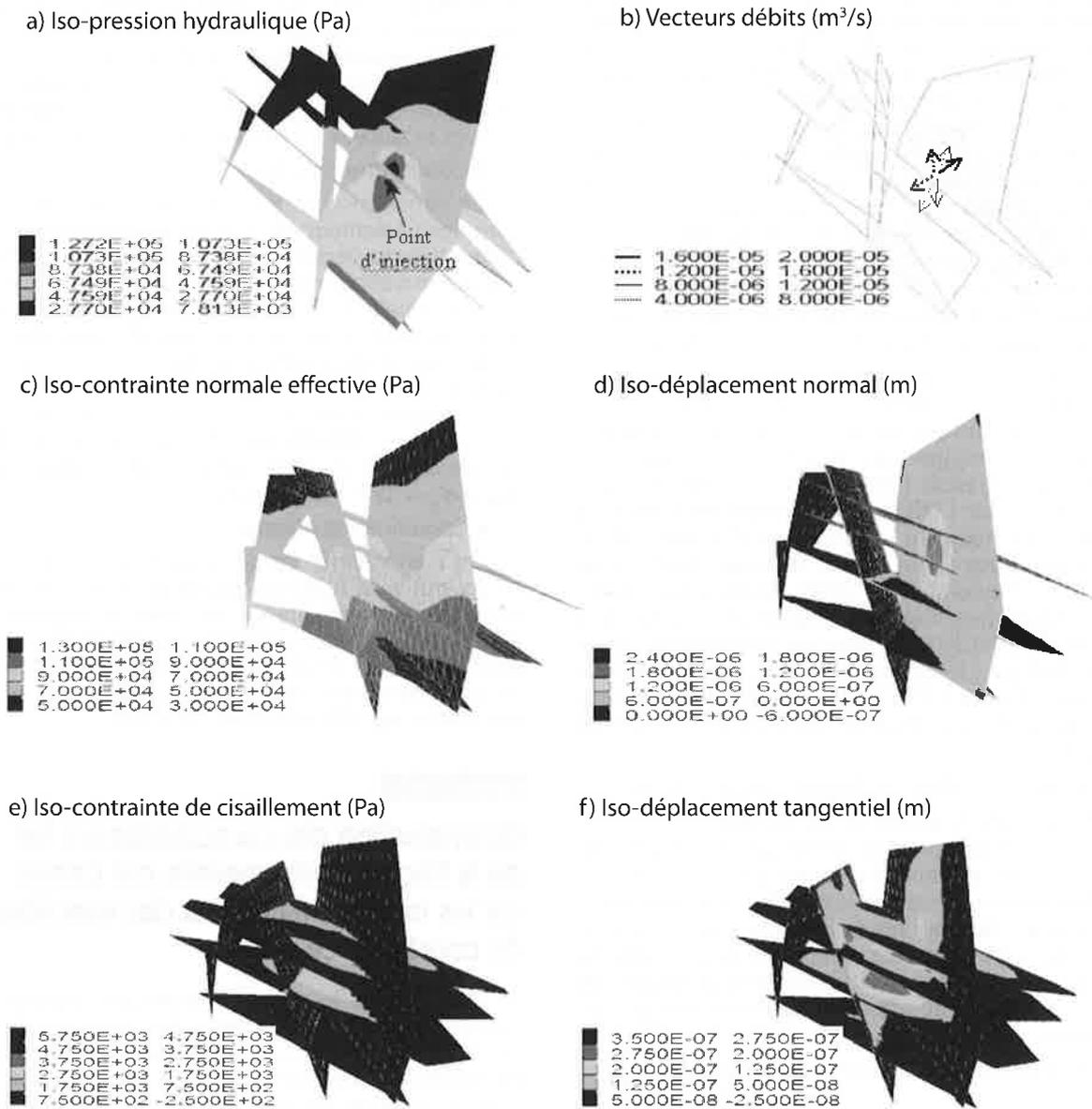


FIG. 6 Distribution calculée avec 3DEC des pressions hydrauliques, des débits, des contraintes et des déplacements dans la fracture instrumentée au pic de pression.
Hydraulic pressure, flowrates, effective stresses, displacements computed with 3DEC software at the peak of hydraulic pressure.

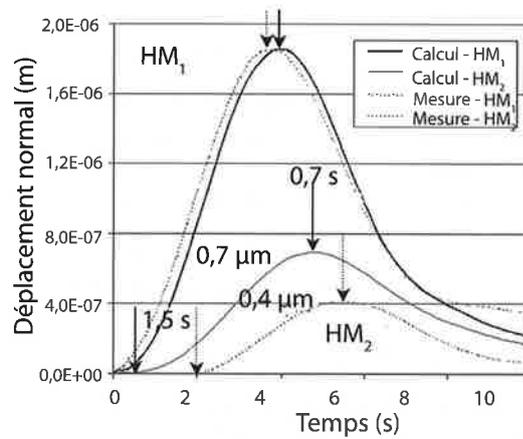
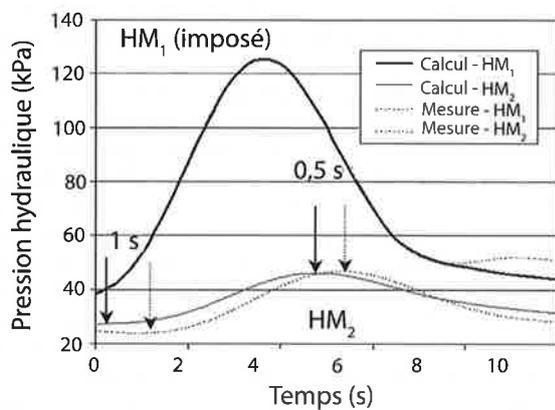


FIG. 7 Évolution au cours du temps des pressions hydrauliques et des déplacements normaux au point d'injection HM_1 et en HM_2 .
Hydraulic pressure and normal displacement evolutions with time at HM_1 and HM_2 .

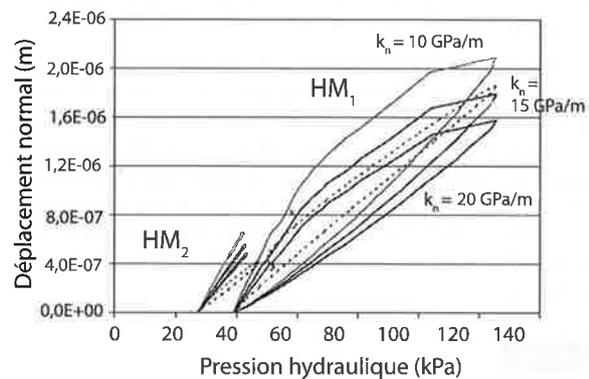
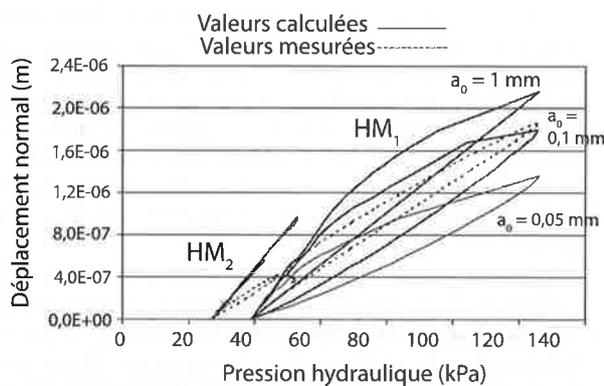


FIG. 8 Impact de l'ouverture hydraulique initiale (a_0) et de la raideur normale (k_n) de la fracture sur les courbes « déplacement normal/pression hydraulique » en HM_1 et HM_2 .
Impact of the initial hydraulic aperture (a_0) and stiffness (k_n) of the fracture on normal displacement versus hydraulic pressure curve at HM_1 and HM_2 .

pendant la phase d'augmentation de la pression et le dysynchronisme après le pic. Si la pente de la courbe $u_n = f(P)$ est bien reproduite pour HM_1 , la largeur calculée de la boucle d'hystérésis est légèrement surestimée. On a montré que la largeur de cette boucle est liée aux caractéristiques mécaniques de l'environnement de la fracture instrumentée, dont le module d'Young de la roche intacte, la densité et la raideur des fractures présentes à proximité (Cappa *et al.*, 2006b).

En HM_2 , en cohérence avec les mesures, le dysynchronisme entre mesures de déplacement et de pression après le pic s'atténue (on s'éloigne du point d'injection). La pente de la courbe $u_n = f(P)$ en HM_2 n'est toutefois pas bien reproduite par le calcul.

On voit donc qu'en première analyse, les résultats obtenus avec le modèle de référence reproduisent qualitativement les mesures. On note toutefois des écarts quantitatifs, soit sur l'amplitude des pressions ou des déplacements, soit sur leurs évolutions au cours du temps.

On a notamment étudié la sensibilité de la courbe $u_n = f(P)$ à une variation de l'ouverture hydraulique et de la raideur normale de la fracture instrumentée. On note alors que :

- les valeurs choisies pour le modèle de référence ($a_0 = 10^{-4}$ m, $k_n = 15$ GPa) permettent d'obtenir une bonne adéquation avec les mesures en HM_1 ;
- pour calibrer le modèle en HM_2 , il faut supposer

une valeur de raideur plus importante ($k_n = 50$ GPa/m) et une valeur d'ouverture hydraulique plus faible ($a_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ m).

Ce résultat met en évidence l'hétérogénéité des caractéristiques mécaniques de la fracture. Il apparaît donc ici qu'une mesure ponctuelle n'est pas forcément représentative des caractéristiques moyennes de la fracture.

4.4

Détermination des caractéristiques HM de la fracture instrumentée par calage sur les mesures faites lors des essais d'injection et de pompage par palier

Dans ce cas, les sollicitations imposées au point HM_1 consistent en une succession de valeurs de pression (essais d'injection) ou de débit (essais de pompage) au point HM_1 . Les simulations sont une succession de calculs hydromécaniques en régime permanent (un calcul par palier de débit ou de pression).

La valeur d'ouverture hydraulique initiale de la fracture instrumentée choisie pour le modèle de référence a été modifiée pour qu'elle soit comprise entre les valeurs extrêmes (0,5 mm et 1,3 mm) obtenues à l'aide du modèle analytique.

Le tableau II rassemble les résultats correspondant aux modèles de référence pour simuler les paliers de pompage et d'injection. On observe, par comparaison avec les valeurs mesurées du tableau I :

- une sous-estimation des variations de pression calculées en HM₁ et HM₂ (de 7 à 8 fois) ;
- une surestimation des débits induits calculés (de 7 à 8 fois) ;
- une sous-estimation des déplacements normaux calculés (6 fois plus faibles en HM₁ et 3 fois plus faibles en HM₂).

Il semble donc que les valeurs choisies pour le modèle de référence pour l'ouverture hydraulique et la raideur normale de la fracture instrumentée soient trop fortes. Après calage du modèle, il apparaît que :

- la valeur optimale pour l'ouverture hydraulique est 0,6 mm (cette valeur reste dans la fourchette des valeurs déterminées à l'aide du modèle analytique). Elle est toutefois 6 fois supérieure à celle obtenue par calage sur les mesures faites lors des injections de courte durée ;
- la détermination des raideurs de fracture *in situ* par calage du modèle n'a pas encore été faite. Compte tenu des écarts entre les résultats du modèle de référence et les mesures en ce qui concerne les déplacements normaux, on peut s'attendre à ce que les valeurs de raideurs normales optimales soient de 2,5 à 5 GPa/m, soit 6 à 3 fois plus faibles que les valeurs obtenues par calage sur les mesures faites lors des injections de courte durée.

5

Synthèse

Les caractéristiques hydromécaniques de la fracture instrumentée (raideur normale et ouverture hydraulique ici) ont été déterminées à partir de la simulation des pulses de courte durée et des essais d'injection et de pompage par paliers. Il apparaît que l'on n'obtient pas les mêmes valeurs pour les caractéristiques hydromécaniques à partir des pulses de courte durée ($k_{n, HM1} = 15$ GPa/m ; $k_{n, HM2} = 50$ GPa/m ; $a_{HM1} = 10^{-4}$ m ; $a_{HM2} = 5 \cdot 10^{-5}$ m) et à partir des essais d'injection et de pompage de longue durée ($k_{n, HM1} = 2,5$ GPa/m ; $k_{n, HM2} = 5$ GPa/m ; $a_{HM1} = 6 \cdot 10^{-4}$ m). Dans le deuxième cas, on obtient donc des raideurs 6 à 10 fois plus faibles et des ouvertures 6 fois plus fortes.

L'origine des écarts vient vraisemblablement du fait que les pulses de courte durée et les essais d'injection/

pompage ont un rayon d'influence très différent. Le pulse affecte un volume de petite taille autour du point d'injection (quelques m³) et sur une très courte période de temps (quelques secondes), alors que les essais d'injection/pompage affectent un volume de roche bien plus important et sur une durée également beaucoup plus longue (30 minutes au minimum par palier). Dans le premier cas, les caractéristiques déterminées par calage correspondent aux caractéristiques locales de la fracture instrumentée à l'endroit de la mesure (les valeurs trouvées dans ce cas sont d'ailleurs assez proches de celles déterminées en laboratoire). Dans le second cas, le comportement de la fracture instrumentée est impacté par la présence des autres fractures ainsi que par les caractéristiques de la matrice rocheuse. Les caractéristiques hydromécaniques déterminées dans ce cas sont en réalité des caractéristiques équivalentes tenant compte des facteurs qui n'ont pas été inclus de façon directe dans le modèle (la présence de petites fractures ou la porosité matricielle par exemple).

Si on veut prédire le comportement hydromécanique « en grand » d'un milieu rocheux fracturé sur une période de temps assez longue, suite à une sollicitation hydraulique (battement de nappe par exemple), on pourra élaborer un modèle simplifié incluant uniquement les fractures principales. On recommande dans ce cas de déterminer leurs caractéristiques hydromécaniques à partir d'un essai d'injection ou de pompage par paliers.

Si on dispose de plus de moyens, et que le modèle prédictif peut simuler explicitement le comportement des différentes composantes du milieu, il peut être intéressant de réaliser des pulses pour déterminer les caractéristiques intrinsèques des différentes fractures.

6

Conclusion et perspectives

D'un point de vue technologique, l'apport principal est la mise au point d'une sonde amovible permettant de faire des mesures simultanées des variations de pression et de déplacement dans une fracture. Les mesures faites par capteurs à fibre optique se révèlent être d'un ordre de grandeur plus précises que les mesures par capteurs à cordes vibrantes (soit 10^{-7} m pour les déplacements et 1 kPa pour les mesures de pression). De plus, la fréquence des mesures peut être bien supérieure (120 Hz), ce qui permet d'enregistrer avec beaucoup plus de finesse les variations temporelles des paramètres mesurés.

TABLEAU II Valeurs calculées en HM1 et HM2 correspondant aux paliers de pompage et d'injection (modèle de référence).

Computed values at HM1 et HM2 for each pumping and injection steps (reference model).

	Débit HM ₁ (l/s)	ΔP_{HM1} (kPa)	$U_{n, HM1}$ (μ m)	ΔP_{HM2} (kPa)	$U_{n, HM2}$ (μ m)
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
-10,06		78,25	1,793	19,21	0,9362

Des expérimentations réalisées sur le site de Coaraze ont démontré l'intérêt de l'utilisation de cette sonde amovible pour étudier à l'échelle locale ou globale le comportement hydromécanique d'un milieu rocheux fracturé.

Le dispositif peut en particulier être utilisé pour déterminer les propriétés hydromécaniques d'une fracture particulière, car il permet à la fois de stimuler une fracture par injection ou pompage, mais également de mesurer la réponse à cette stimulation. Les interprétations classiques basées sur des modèles analytiques sont parfois suffisantes pour estimer l'ouverture hydraulique de la fracture. L'utilisation simultanée de deux sondes permet toutefois de réduire l'erreur classique liée à la méconnaissance de la distance d'influence de la sollicitation (que l'on estime souvent d'environ 30 %). Une autre source d'erreur est liée aux effets couplés hydromécaniques qui peuvent être importants dans certains cas. La qualité de l'interprétation pourra être significativement améliorée à l'aide de simulations numériques 3D. Ces simulations auront également

l'avantage de préciser la valeur de la raideur normale de la fracture.

Des travaux complémentaires sont actuellement en cours dans le cadre du programme (PNR) HPPP-CO₂ (Guglielmi *et al.*, 2007, 2008) pour améliorer les performances de la sonde. Il s'agit en particulier de modifier la sonde afin de pouvoir mesurer les déplacements relatifs des épontes dans toutes les directions de l'espace, de réaliser des mesures dans le cas de milieux partiellement saturés, et de l'utiliser dans des forages profonds. Parallèlement, la méthode d'interprétation par modélisation numérique doit également être affinée par une évaluation plus précise de l'impact de l'environnement de la fracture sur les mesures. Les résultats de caractérisation de laboratoire, qui permettent déjà d'établir le lien entre les relations de couplage hydromécanique et la morphologie de la fracture (Souley *et al.*, 2007 ; Lopez *et al.*, 2007), doivent également être utilisés pour améliorer la représentativité des modèles interprétatifs à l'échelle de l'expérimentation.

Bibliographie

- Cappa F, Guglielmi Y, Fénart P, Merrien-Soukatchoff V, Thoraval A. – Hydromechanical interactions in a fractured carbonate reservoir inferred from hydraulic and mechanical measurements. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sc.*, 42, 2005, p. 287-306.
- Cappa F, Guglielmi Y, Gaffet S, Lançon H, Lamarque I. – Use of fiber optic sensors to in situ characterize highly heterogeneous deformation field elastic changes in fractured rocks. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sc.* 43, 2006a, p. 647-654.
- Cappa F, Guglielmi Y, Rutqvist J., Tsang C.-F., Thoraval A. – Hydromechanical modelling of pulse tests that measure fluid pressure and fracture normal displacement at the Coaraze laboratory site, France. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sc.*, 43, 2006b, p. 1062-1082.
- Gentier S. – Fractures dans les roches cristallines. Effet des déformations sur les circulations de fluide. *Collection Sciences & Techniques de l'ANDRA*, octobre 2002.
- Fénart P, Guglielmi Y, Dunat X. – Contribution to the modelling of jointed rock mass hydromechanical behavior. *International Congress of ISRM*, 02-07 June 2001, Espoo, Finland, p. 229-234.
- Guglielmi Y. – Apport de la mesure des couplages hydromécaniques à la connaissance hydrogéologique des réservoirs fissurés : approche sur le site expérimental. Habilitation à diriger des recherches, Université de Franche-Comté, janvier 1999.
- Guglielmi Y., Cappa F, Rutqvist J., Tsang C.-F., Thoraval A. – Mesoscale characterization of coupled hydromechanical behavior of a fractured-porous slope in response to free water-surface movement, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sc.*, 45 (6), 2008, p. 862-878.
- Guglielmi Y., Virieux J., Lançon H., Janowczyk J.B., Bigarre P., Rutqvist J., Vanorio T. - High pulse poroelasticity protocol for geophysical monitoring of CO₂ injection in reservoirs ; the « High-Pulse Poroelasticity Protocol » (HPPP). *Recueil des résumés du séminaire Captage et stockage du CO₂*, 12-13 décembre 2007, Pau, 2007, p. 92.
- Hosni A., Gentier S., Rachez X., Billaux D. – 3D-hydromechanical modeling of hydraulic stimulation of deep geothermal wells in Hot fractured Rock at Soultz-sous-Forêts (Alsace-France). *International GEOPROC conference on Coupled T-H-M-C Processes and Modeling of Geosystems*, Stockholm, Oct. 13-15 2003.
- Itasca Consulting Group, Inc. – *UDEC Universal Distinct Element Code*, Version 2.0. Volume I : User's Manual; Volume II : Verification Problems and Example Applications. Minneapolis, Minnesota : ICG, 1993.
- Itasca Consulting Group, Inc. – *3DEC 3-Dimensional Distinct Element Code*, Version 1.5. Volume I : User's Manual ; Volume II : Verification Problems and Example Applications. Minneapolis, Minnesota : ICG, 1994.
- Korini T. – Notices d'utilisation des logiciels RESOBLOK et BSA. 16 août 2000.
- Lopez P, Thoraval A., Rahmani I., Buzzi O., Boulon M. – Advances in constitutive modelling of jointed rock hydro mechanical interactions at laboratory scale. *Actes du 18^e Congrès français de mécanique, 14^e Colloque franco-polonais de mécanique des sols et des roches*, 29-31 août 2007, Grenoble.
- Rutqvist J. – Determination of hydraulic normal stiffness of fractures in hard rock from well test. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 32, 1995, p. 513-523.
- Souley M., Boulon M., Rahmani I., Thoraval A. – Mesure en laboratoire des échanges hydrauliques entre fracture et matrice et des couplages hydromécaniques associés dans le cas d'une roche gréseuse, *Proceedings of the 11th congress of the international society for rock mechanics*, 9-13 July 2007, Lisbon, Portugal. Leiden, The Netherlands, Taylor & Francis, vol. 1, 2007, p. 327-330.
- Thoraval A., Renaud V. – Hydromechanical upscalings of a fractured rockmass using a 3D numerical approach. *International GEOPROC conference on Coupled T-H-M-C Processes and Modeling of Geosystems*, Stockholm, Oct. 13-15 2003.
- Thoraval A. – Analyse du comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés à partir d'essais *in situ* et de modélisation. Rapport final BCRD-DRS-02/01, INERIS, 2005.
- Thoraval A., Gatelier N., You T. – De certains effets hydromécaniques lors du creusement et de l'exploitation de galeries de stockage en milieu fracturé. *Revue française de géotechnique*, n° 113, 2005, p. 41-51.