Caractérisation hydromécaniques des fractures in situ. Développement d'une sonde amovible d'auscultation et amélioration des méthodes d'interprétation par simulations numériques 3D

Alain Thoraval, Y. Guglielmi, Frédéric Cappa

▶ **To cite this version:**

Alain Thoraval, Y. Guglielmi, Frédéric Cappa. Caractérisation hydromécaniques des fractures in situ. Développement d'une sonde amovible d'auscultation et amélioration des méthodes d'interprétation par simulations numériques 3D. Revue française de Géotechnique, 2009, 128, pp.35-45. ineris-00961946

HAL Id: ineris-00961946

https://ineris.hal.science/ineris-00961946

Submitted on 20 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CARACTERISATION HYDROMECANIQUE DES FRACTURES IN SITU DEVELOPPEMENT D'UNE SONDE AMOVIBLE D'AUSCULTATION ET AMELIORATION DES METHODES D'INTERPRETATION PAR SIMULATIONS NUMERIQUES 3D

IN SITU HYDROMECANICHAL FRACTURE CHARACTERIZATION DEVELOPMENT OF A SOUNDING REMOVABLE PROBE AND IMPROVEMENT OF INTERPRETATION METHODS USING 3D NUMERICAL SIMULATIONS

A. Thoraval*, Y. Guglielmi**, F. Cappa**

* INERIS, Ecole Supérieure des Mines de Nancy, Parc de Saurupt
54042 Nancy cedex
e-mail : alain.thoraval@ineris.fr

** GEOSCIENCE-AZUR, Bât 4, 250 rue Albert Einstein, Les Lucioles 1, Sophia Antipolis
06560 Valbonne
e-mail : 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 au 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 : couplages hydromécaniques, fractures, caractérisation, mesures in situ, essai d'injection, modélisations numériques, écoulement, déformation, 3DEC.

Abstract : A removable device allowing the *in situ* fracture monitoring through the realization of simultaneous pressure and mechanical displacement measurements 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 rockmass located in

southerneast France. The experiments consisted in injection and pumping of water volumes (by 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 by calage the hydraulic and mechanical characteristics of the fractures (normal stiffness, hydraulic aperture).

Keywords: hydromechanical couplings, fractures, characterization, in situ measurements, pulse test, numerical modelling, flow, deformation, 3DEC.

1. 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 la géothermie et celle de réservoirs pétroliers, les risques de transport 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 basée sur une amélioration conjointe de la qualité des mesures in situ et des méthodes d’interprétation.

2. Amélioration des techniques de mesure in situ

2.1 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 récente 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 pressions hydrauliques).

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 ces deux épontes. D'autres auteurs ont mis en évidence le lien entre la conductivité hydraulique de la fracture (autrement dit sa perméabilité) 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 :

$$\Delta\sigma'_n = \Delta\sigma_n - b\,\Delta P \qquad (1)$$

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

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

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).

2.2 Limite 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'essai 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 effets complexes des fractures et hétérogénéités environnants la fracture testée qui ne sont pas vues à l'échelle du laboratoire. Il est donc important de compléter la caractérisation de laboratoire par une caractérisation à plus grande échelle faite *in situ*.

2.3 Limite des caractérisations classiques faites in situ

Le « 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 des « pulses-tests » 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, ils ne prennent pas en compte également l'impact des couplages hydromécaniques sur la mesure.

2.4. 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 (a), 2006].

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 ces 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 (Figure 2) est composé d'un capteur de déplacement installé entre deux ancrages mécaniques indépendants des obturateurs. Un capteur de pression est disposé sur un tube d'extension de longueur ajustable en fonction de la longueur de chambre voulue.

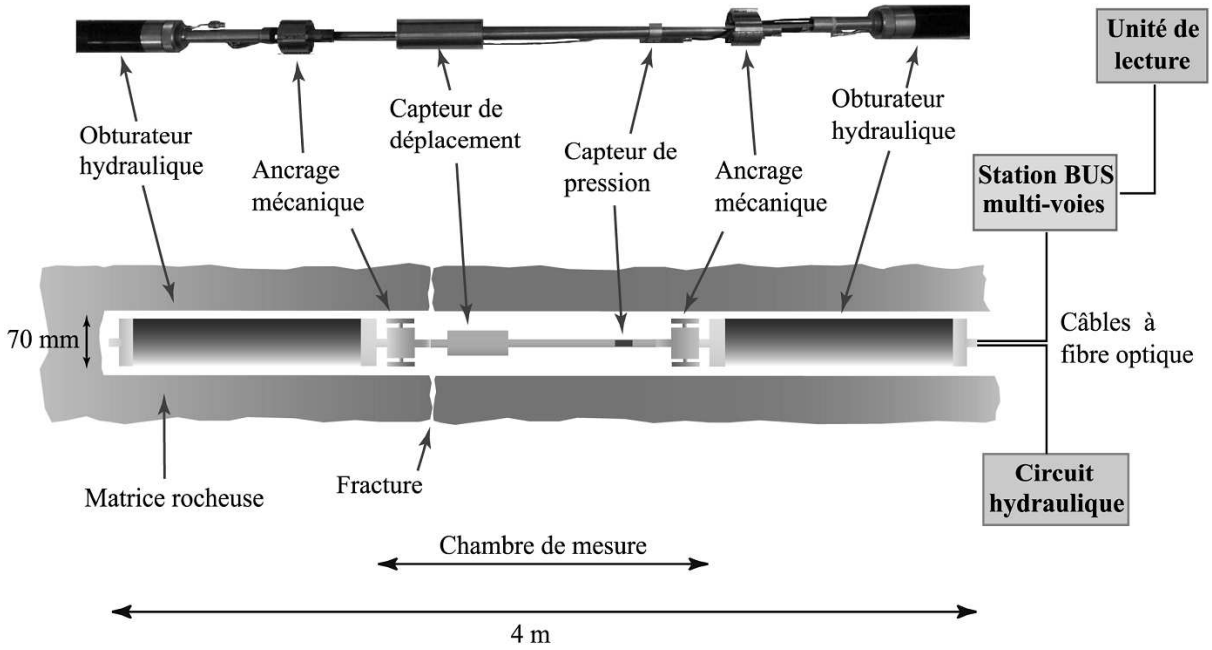
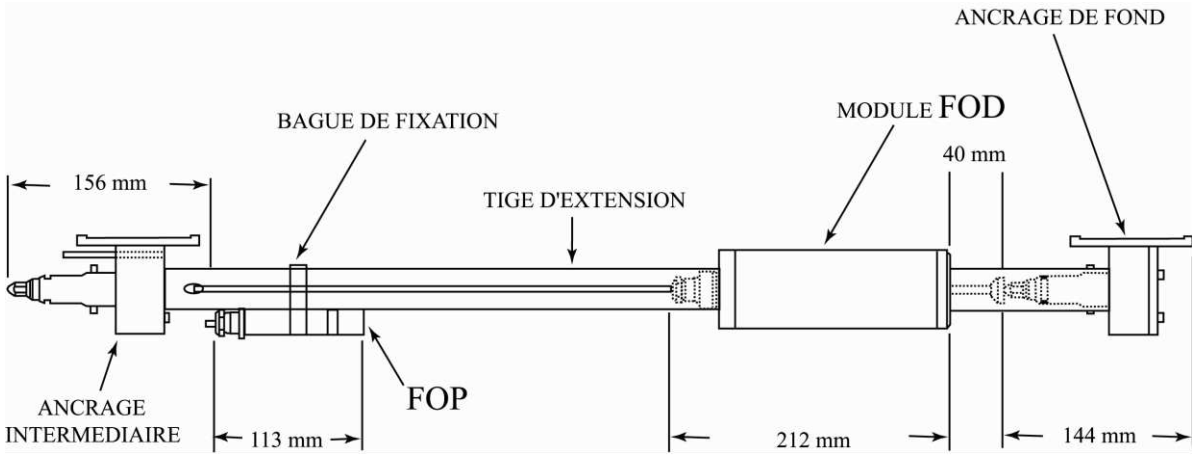


Figure 1 : Premier prototype de la sonde de mesures couplées hydromécaniques équipée de capteurs à fibres optiques

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 mesurées.



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

Figure 2 : Détail du système central de mesures (intérieur de la chambre d'injection)

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) composé d'une série de calcaires fracturés (d'âge Crétacé inférieur) de 15 m d'épaisseur (Figure 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 (Figure 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).

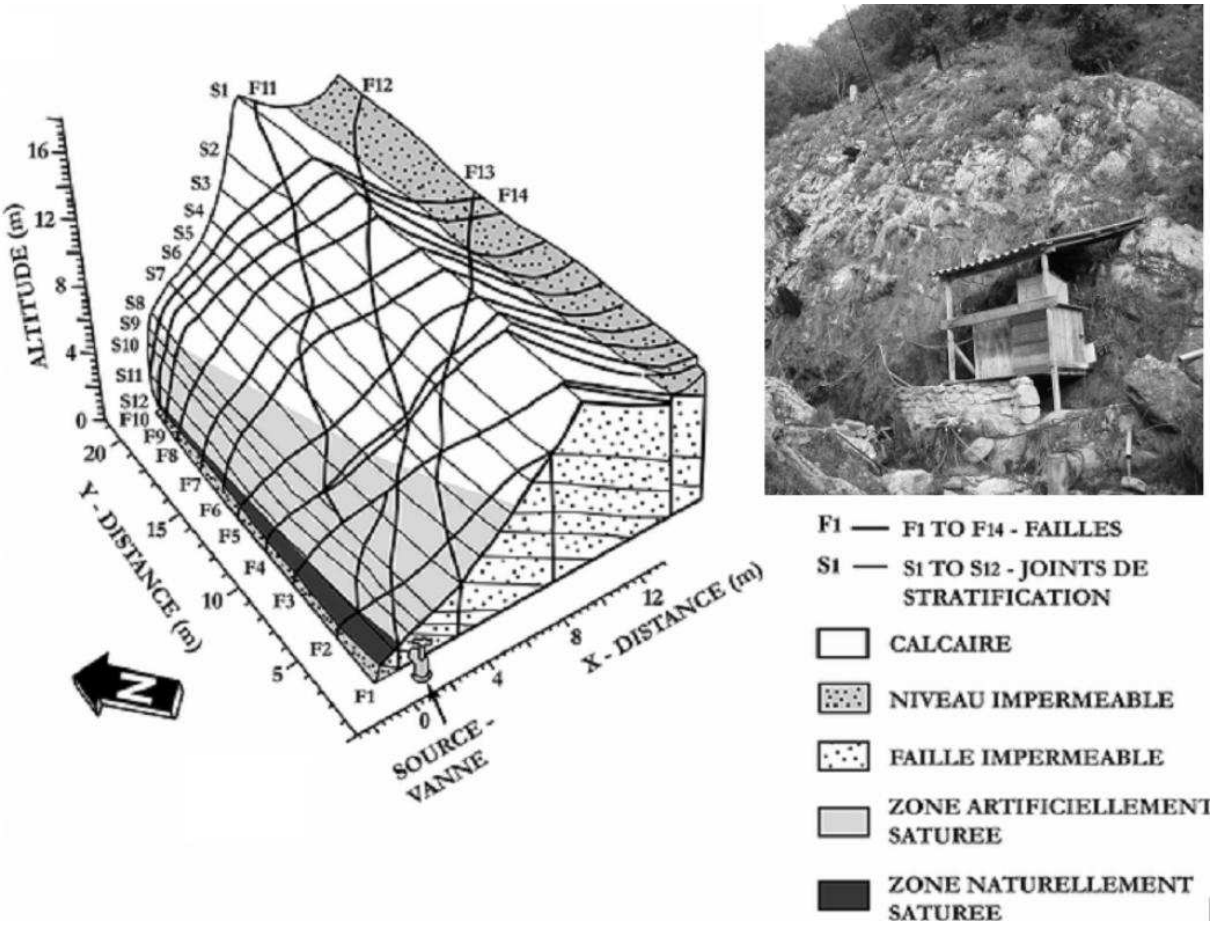


Figure 3 : Vue 3D du site de Coaraze

et contexte hydrogéologique du massif rocheux fracturé

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 :

- les joints de stratification (Si) orientés N25 à N50 avec un pendage de 45E ;
- des failles (Fi, i : 1 à 10) orientées 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) orientées N50 à N90 avec un pendage de 70 à 80SE (donc quasi parallèles au versant instrumenté du site) présentent les plus grands chenaux karstiques.

Des relevés complémentaires ont été réalisés dans le but de simuler avec un maximum de précision les expérimentations faites sur le site, à l'aide d'un tachéomètre haute précision. 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'expérimentation 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 sont décrits dans [Guglielmi, 1999 ; 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 normaux au plan de fracture induits par la sollicitation (Figure 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 (pulses-tests) 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 sont réalisées en condition hydraulique saturée (correspondant à l'état d'équilibre du site à vanne fermée).

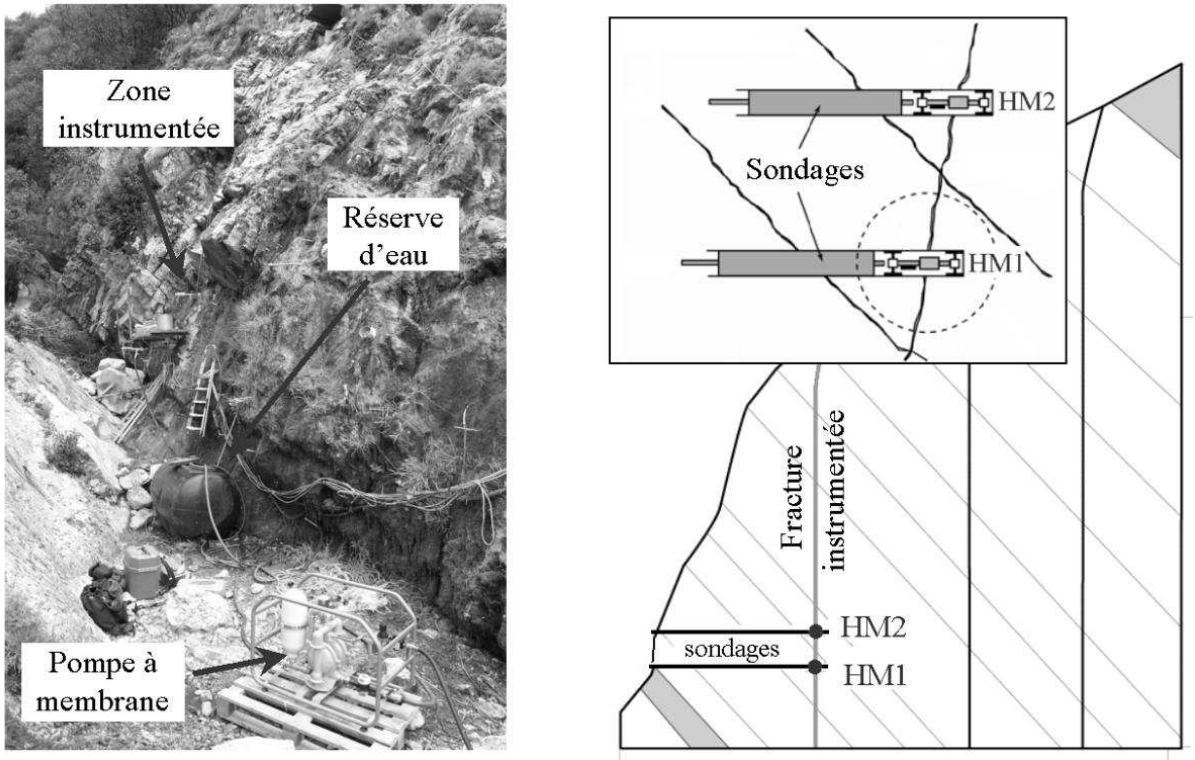


Figure 4 : Dispositif d'injection et de pompage utilisé

pour la sollicitation localisée d'une fracture particulière

3.3.1 Description des expérimentations de courte durée

La Figure 5 montre la variation au cours du temps de la pression hydraulique dans la fracture instrumentée au niveau de son intersection avec les forages (notée HM_1 et HM_2), 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 HM_1, 25 kPa en HM_2). Le maximum de pression est atteint en HM_2 avec un décalage temporel de 1,3 s.

Le déplacement normal induit est synchrone en HM_1 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 HM_1 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 (Figure 5). Cette diachronie s'atténue lorsque l'on s'écarte du point d'injection.

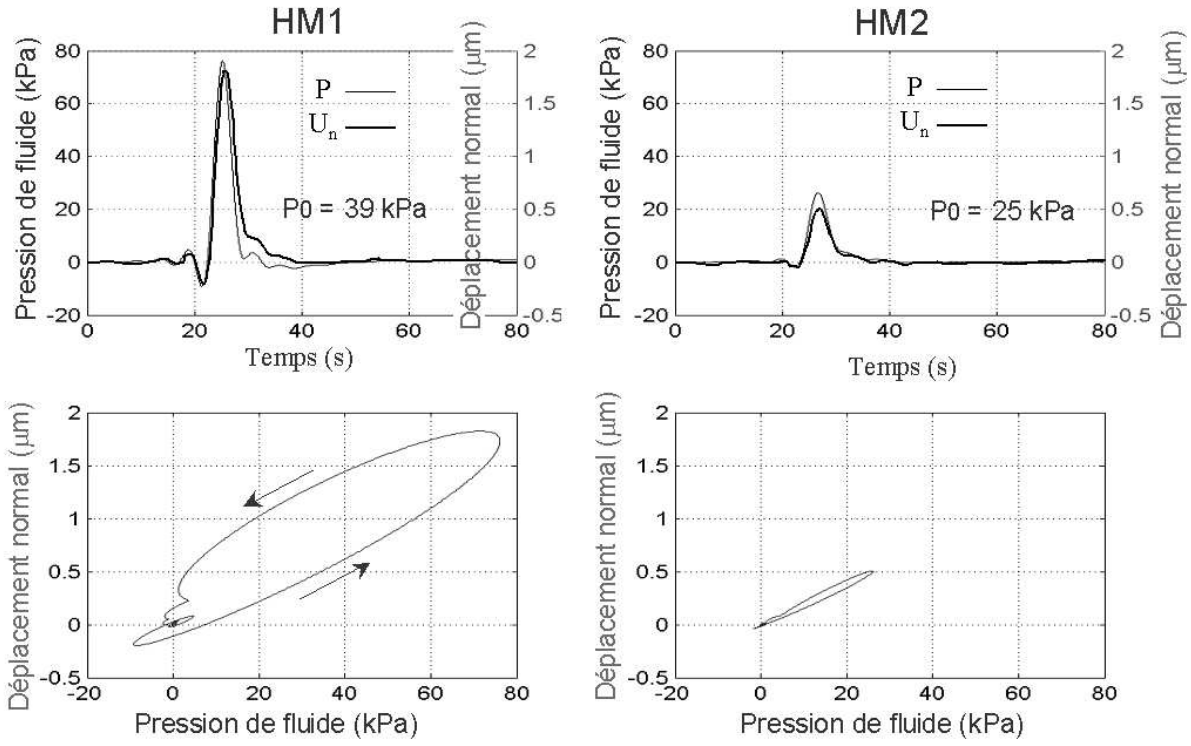


Figure 5 : Variations de pression de fluide et de déplacement normal en HM_1 et HM_2 pour une injection de courte durée (pulse-test) imposée en HM_1.

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 HM_1 et HM_2 sont rassemblées dans le Tableau 1 (les valeurs imposées sont en gras) :

	débit HM_1 (l/s)	**ΔP_HM_1 (kPa)**	**Un_HM_1 (µm)**	**ΔP_HM_2 (kPa)**	**Un_HM_2 (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	pas de mesures
	0,69	**36**	1	28	
	1,19	**78**	2,35	74	

Tableau 1 : Synthèse des mesures faites en HM_1 et HM_2 correspondant aux paliers de pompage et d'injection

- le pompage induit des variations de la pression hydraulique et du déplacement normal en HM_1 et HM_2. Il apparaît qu'il est nécessaire d'imposer un débit de pompage de 0,77 l/s pour que la pression s'annule en HM_1. Le pompage induit par ailleurs des déplacements normaux (fermeture) maximaux de 0,9 mm en HM_1 et de 0,2 mm en HM_2 ;
- les pressions imposées au cours de l'injection induisent des débits injectés respectifs de 0,7 litre/s et 1,2 litre/s en HM_1 et des déplacements normaux (ouverture) de 1 mm et 2,35 mm. En HM_2, 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 HM_2.

4. 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, nous disposons d'informations complémentaires, puisque nous avons mesuré également les variations de la pression hydraulique en un point de la fracture HM_2 localisé à une distance r_e = 1,1 m de HM_1. Dans ce cas, on peut écrire [Rutqvist J. & al, 2002] :

$$\frac{Q}{\Delta h} = Ca^3 \tag{3}$$

où : Q est le débit au point sollicité (HM_1) ; $C = 2\pi\left(\frac{\rho g}{12\mu}\right) \Big/ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)$, où r_w est le rayon du forage (r_w = 0,035 m) ; Δh est la variation de charge entre le point sollicité (HM_1) et le point extérieur (HM_2), soit $\Delta h = [(P^f_{HM1} - P^i_{HM1}) - (P^f_{HM2} - P^i_{HM2})] / \rho g$.

En représentant la variation de $[(P^f_{HM1} - P^i_{HM1}) - (P^f_{HM2} - P^i_{HM2})]$ en fonction du débit Q injecté en HM_1, on constate 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 :

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

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 mm < a < 1,3 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 donc 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, 2001]. Ce modèle a été construit à partir des données de fracturation. Nous avons introduit une à une les 60 à 70 fractures répertoriées 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 & al, 2003 et 2005 ; Hosni A. 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 que la matrice a un comportement élastique ; que 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) ; que la loi d'écoulement dans les fractures est la loi cubique ; que 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 : une valeur k_n = 15 GPa/m 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 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 : une valeur $a_0 = 10^{-4}$ m. 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 choisi par ailleurs $a_0 = 10^{-5}$ 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 environ 7 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 $\sigma_n i = 120$ kPa en HM_1 (la contrainte effective initiale en HM_1 vaudrait donc selon la relation de Terzaghi $\sigma'_{ni} = 120 - 45 = 75$ kPa) ;

▪ conditions aux limites : On a d'autre part 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 modèle, les conditions aux limites n'avaient pas d'effet significatif sur les résultats.

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

Nous avons simulé le pulse en imposant l'évolution des pressions hydrauliques mesurées au cours du temps au point d'injection. Les simulations seront 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 réalisé à chaque pas de temps hydraulique afin d'obtenir un équilibre mécanique à chaque cycle hydraulique.

Nous avons rassemblé sur la Figure 6 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.

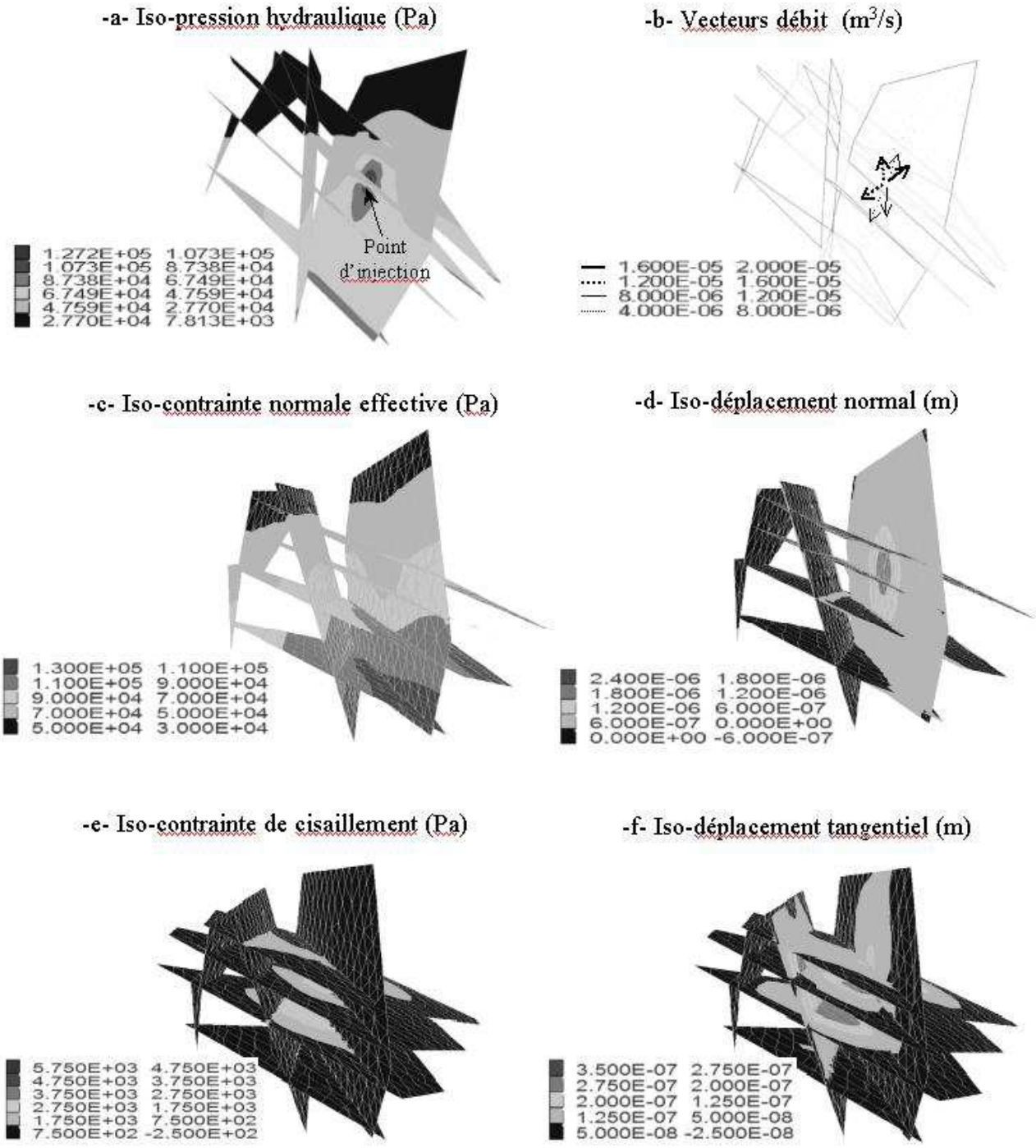


Figure 6 : Distribution calculée avec 3DEC des pressions hydrauliques, des débits, des contraintes et des déplacements dans la fracture instrumentée au pic de pression

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 qu'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.

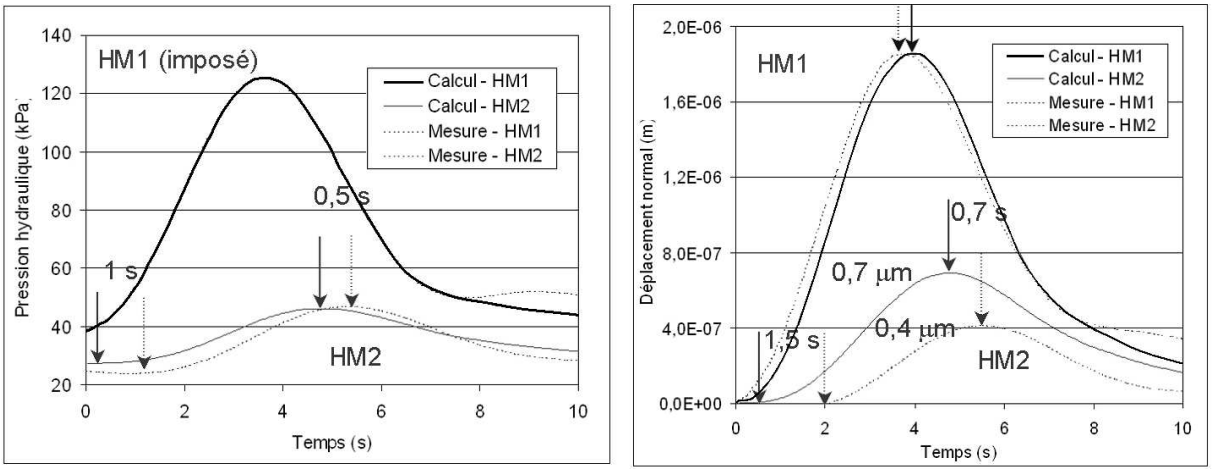


Figure 7 : Evolution au cours du temps des pressions hydrauliques et des déplacements normaux dans la fracture instrumentée au point d'injection (HM_1) et en HM_2

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 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 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. Nous avons pu montrer [Cappa et al (b), 2006] que la largeur de cette boucle est liée aux caractéristiques mécaniques de l'environnement de la fracture instrumentée (module de Young de la roche intacte, densité et raideur des fractures présentes à proximité).

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.

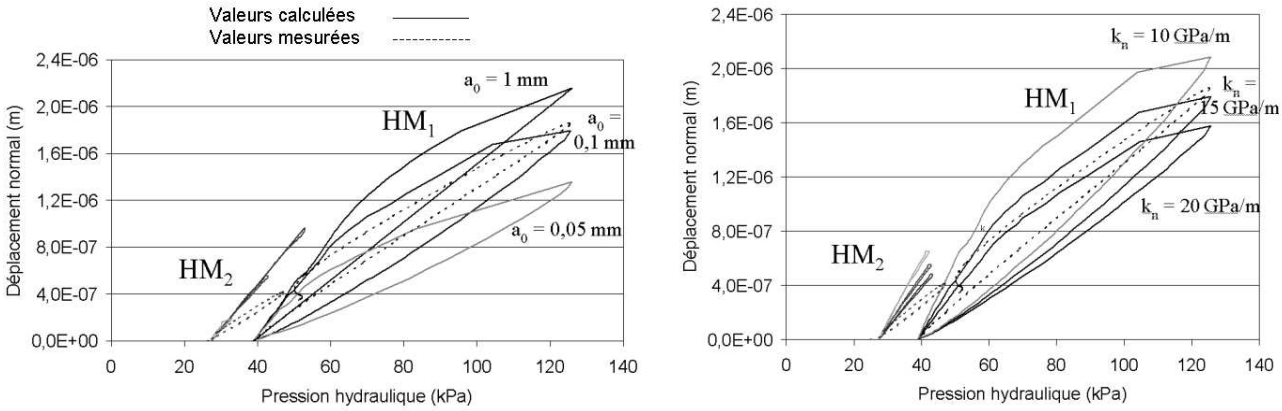


Figure 8 : Impact de l'ouverture hydraulique initiale et de la raideur normale de la fracture instrumentée sur les courbes « déplacement normal / pression hydraulique » en HM_1 et HM_2

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.

Nous avons 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 :

- 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 ;
- qu'il faut supposer une valeur de raideur plus importante ($k_n = 50$ GPa/m) et d'ouverture hydraulique plus faible ($a_0 = 5.10^{-5}$ m) pour calibrer le modèle en HM_2.

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.

4.2.3 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 2 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 1 : une sous-estimation des variations de pression calculées en HM_1 et HM_2 (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 HM_1 et 3 fois plus faibles en HM_2).

	débit HM_1 (l/s)	ΔP_HM_1 (kPa)	Un_HM_1 (µm)	ΔP_HM_2 (kPa)	Un_HM_2 (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

Tableau 2 : Valeurs calculées en HM1 et HM2 pour le modèle de référence correspondant aux paliers de pompage et d'injection

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 se situe 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 (kn_{HM1}=15 GPa/m ; kn_{HM2}=50 GPa/m ; $a_{HM1} = 10^{-4}$ m ; $a_{HM2} = 5.10^{-5}$ m) et à partir des essais d'injection et de pompage de longue durée (kn_{HM1}=2.5 GPa/m ; kn_{HM2}=5 GPa/m ; $a_{HM1} = 6.10^{-4}$ 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 m^3) 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 deuxième 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 d'essai d'injection ou de pompage par paliers.

Si l'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. Conclusions 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 relèvent 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.

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 2 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 (programme HPPP-CO_2 [Guglielmi et al, 2007]) pour améliorer les performances de la sonde. Il s'agit en particulier de modifier la sonde de sorte à 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 & al, 2007] [Lopez & al, 2007]) doivent également être utilisés pour améliorer la représentativité des modèles interprétatifs à l'échelle de l'expérimentation.

7. Bibliographie

Cappa F., Guglielmi Y., Fénart P., Merrien-Soukatchoff V., Thoraval A, 2005. Hydromechanical interactions in a fractured carbonate reservoir inferred from hydraulic and mechanical measurements. Int. J. Rock. Mech. Min. Sc., 42 (2005) 287-306.

Cappa F., Guglielmi Y., Gaffet S., Lançon H., Lamarque I., 2006 (a) : 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 (2006) 647-654.

Cappa F., Guglielmi Y., Rutqvist J., Tsang C-F, Thoraval A. 2006 (b). 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 (2006) 1062-1082.

Gentier S., 2002. Fractures dans les roches cristallines – Effet des déformations sur les circulations de fluide. Collection Sciences & Techniques de l'ANDRA, octobre.

Fenart P., Guglielmi Y. & Dunat X., 2001 : Contribution to the modelling of jointed rock mass hydromechanical behavior. International Congress of IRSM, 02-07 June, Espoo, Finland, p. 229-234.

Guglielmi Y., 1999 : Apport de la mesure des couplages hydromécaniques à la connaissance hydrogéologique des réservoirs fissurés : approche sur le site expérimental. Habilitation à diriger des recherche, Université de Franche-Comté, Janvier.

Guglielmi Y., Cappa F., Rutqvist J., Tsang C-F, Thoraval A. 2007. Mesoscale characterization of coupled hydromechanical behavior of a fractured-porous slope in response to free water-surface movement, Int. J. Rock. Mech. Min. Sc., [sous presse].

Guglielmi Y., Virieux J., Lancon H., Janowczyk J.B., Bigarre P., Rutqvist J., Vanorio T., 2007. High pulse poroelasticity protocole for geophysical monitoring of CO2 injection in reservoirs : the "High-Pulse Poraelasticity Protocol" (HPPP). Recueil des résumés du séminaire "Captage et stockage du CO_2", 12-13 décembre 2007, Pau, p. 92.

Hosni A., Gentier S., Rachez X., Billaux D., 2003. 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.

Itasca Consulting Group, Inc., 1993. UDEC Universal Distinct Element Code, Version 2.0: Volume I: User's Manual; Volume II: Verification Problems and Example Applications. Minneapolis, Minnesota: ICG.

Itasca Consulting Group, Inc., 1994. 3DEC 3-Dimensional Distinct Element Code, Version 1.5: Volume I : User's Manual ; Volume II : Verification Problems and Example Applications. Minneapolis, Minnesota : ICG.

Jing L., 2003. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering. Int. J. Rock. Mech. Min. Sc., 40 (2003) 283-353.

Korini T., 2000. Notices d'utilisation des logiciels RESOBLOK et BSA. 16 août.

Lopez P., Thoraval A., Rahmani I., Buzzi O., Boulon M., 2007 : Advances in constitutive modelling of jointed roxk hydro mechanical interactions at laboratory scale, Actes du 18ème Congrès Français de mécanique, 14ème Colloque Franco-Polonais Mécanique des sols et des roches, 29-31 août 2007, Grenoble.

Rutqvist J., 1995. Determination of hydraulic normal stiffness of fractures in hard rock from well test. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 32 (1995) 513-523.

Souley M., Boulon M., Rahmani I., Thoraval A., 2007 : 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, 2007, vol. 1, pp. 327-330.

Thoraval A., Renaud V., 2003. Hydromecanical 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.

Thoraval A., 2005. Analyse du comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés à partir d'essais in situ et de modélisation. Rapport final BCRD-DRS-02/01 référencé INERIS-DRS-05-66388/RN01, 15 décembre.

Thoraval A., Gatelier N., You T., 2005 : De certains effets hydromécaniques lors du creusement et de l'exploitation de galeries de stockage en milieu fracturé. Revue française de géotechnique ISSN 0181-0529, 2005, n°113, pp. 41-51.