Caractérisation hydromécanique des milieux rocheux fracturés en laboratoire et in situ

Alain Thoraval

▶ **To cite this version:**

Alain Thoraval. Caractérisation hydromécanique des milieux rocheux fracturés en laboratoire et in situ. Rapport Scientifique INERIS, 2007, 2006-2007, pp.86-89. ineris-01869099

HAL Id: ineris-01869099
https://ineris.hal.science/ineris-01869099

Submitted on 6 Sep 2018

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.

Caractérisation hydromécanique des milieux rocheux fracturés en laboratoire et *in situ*

Alain Thoraval

Sonde amovible utilisée pour mesurer in situ *les variations de pression hydraulique et de déplacement dans une fracture (développement et utilisation en partenariat avec Géosciences-Azur).*

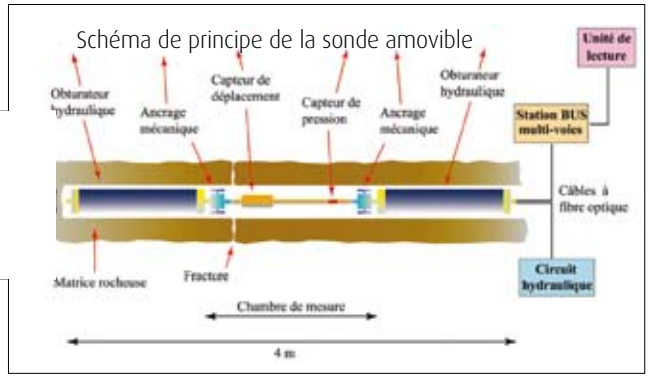
Site pilote de Coaraze (Alpes-Maritimes)

La gestion des risques associés aux ouvrages souterrains d'origine anthropique, qu'ils soient liés aux problématiques de l'exploitation du sous-sol (mines et carrières en activité ou abandonnées, talus rocheux), de l'enfouissement des déchets ou du stockage de CO_2, ou encore de l'amélioration des ressources géothermiques, pétrolières ou en eau souterraine, nécessite de mieux comprendre et de pouvoir prédire le comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés.
Les enjeux scientifiques se rapportent à la fois à l'évaluation de la stabilité mécanique des massifs rocheux fracturés et à la quantification des écoulements en leur sein, sachant que ces deux aspects dépendent étroitement l'un de l'autre.
La stabilité d'un massif rocheux fracturé est, en effet, directement influencée par la pression hydraulique des fluides dans les fractures et les pores, alors que la perméabilité d'un ouvrage de stockage est affectée par l'état de contrainte mécanique autour de celui-ci [1].
Les recherches entreprises à l'INERIS, en partenariat avec divers laboratoires universitaires (laboratoire Géosciences-Azur de l'Université de Nice, le laboratoire des Sols, Solides, Structures - L3S - de l'Institut Polytechnique de Grenoble, laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages associant l'Institut National Polytechnique de Lorraine et l'INERIS), ont porté sur l'amélioration de la caractérisation hydromécanique des milieux rocheux poreux et fracturés à partir d'expérimentations *in situ* et d'essais de laboratoire [2]. Cette amélioration a été rendue possible grâce au développement de nouveaux outils de caractérisation et de méthodes d'interprétation et de prédiction basées sur la modélisation numérique.
Les acquis scientifiques concernent l'évaluation des lois d'écoulement et de couplage hydromécanique des fractures de l'échelle décimétrique (essai de laboratoire) ainsi qu'à l'échelle décamétrique (expérimentation *in situ*).

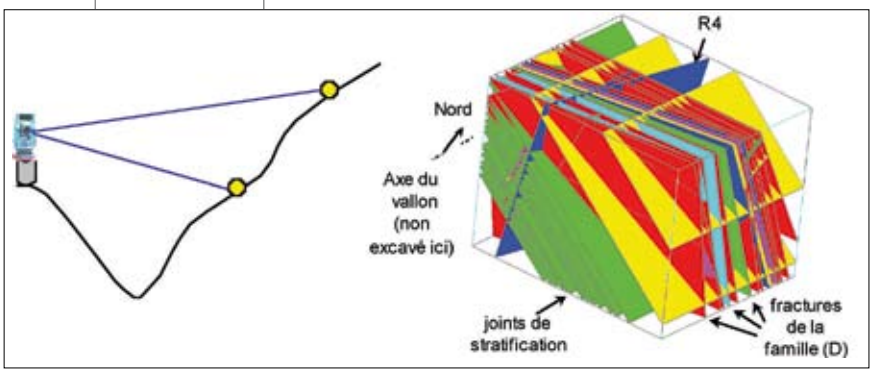
EXPÉRIMENTATIONS *IN SITU*

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 en partenariat avec Géosciences-Azur.
Les mesures 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

1



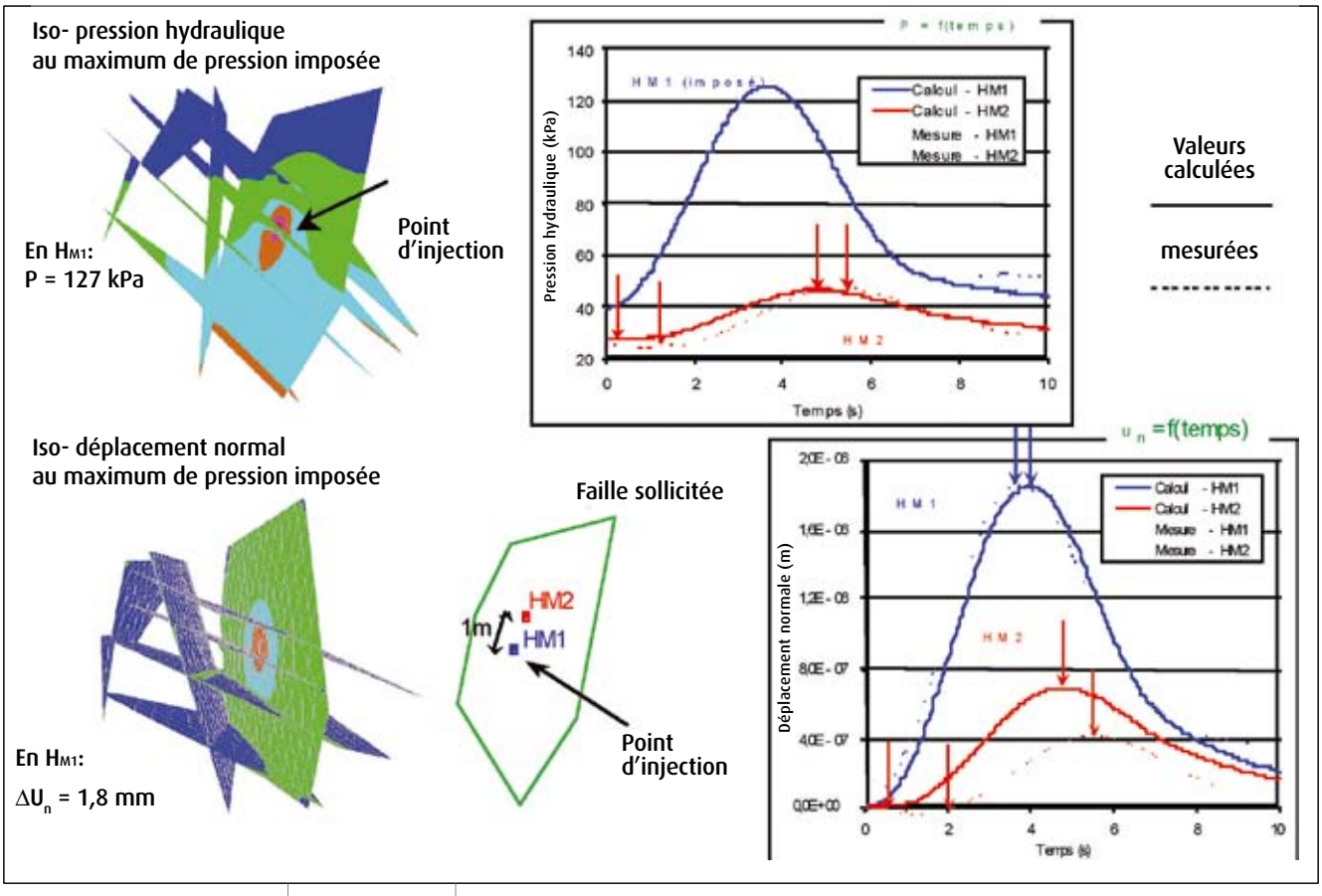
2



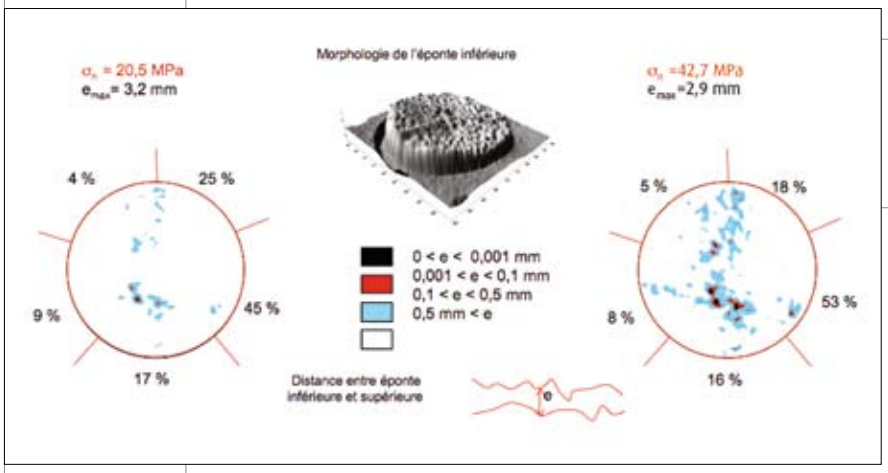
Construction du modèle géométrique du site de Coaraze à partir de mesures de fracturation par tachéométrie.

temporelles des paramètres mesurés. Le dispositif a été utilisé *in situ* dans un affleurement calcaire fracturé, spécifiquement aménagé, localisé près du village de Coaraze au nord de Nice. Les expérimentations ont consisté à réaliser des injections de courte durée (pulse-tests) et des essais de pompage et d'injection de plus longue durée. À cette fin, deux forages horizontaux HM1 et HM2 ont été réalisés dans un secteur correspondant à une zone de joints de stratification peu perméables recoupés par des failles sub-verticales très perméables. L'expérimentation a consisté à injecter ou pomper un certain volume d'eau (en contrôlant la pression ou le débit) au droit de l'intersection d'une faille, soit avec le forage HM1, soit avec le forage HM2 (figure 1). Le dispositif instrumental mis au point et le traitement du signal appliqué aux mesures se sont révélés pertinents pour caractériser *in situ* le comportement hydromécanique des fractures. Parallèlement, l'INERIS a développé ou utilisé la modélisation numérique pour reproduire et analyser, plus en profondeur, les résultats des expérimentations et des essais de laboratoire. Le logiciel RESOBLOK a ainsi été utilisé pour représenter la géométrie du massif rocheux fracturé, de même que les logiciels UDEC et 3DEC pour simuler la réponse du milieu à une sollicitation hydromécanique. Un modèle géométrique déterministe du site de Coaraze a été construit à partir des relevés de fracturation basée sur l'utilisation d'un tachéomètre haute précision.

Interprétation des mesures in situ *par modélisation numérique (code 3DEC).*



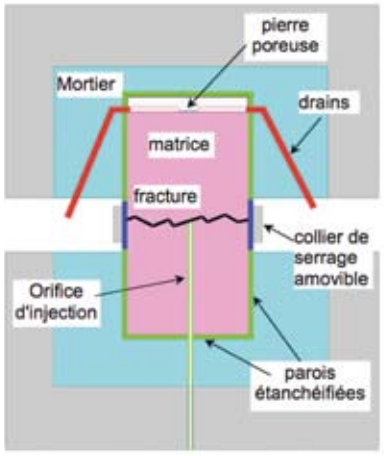
3



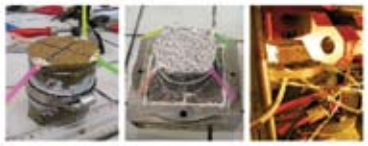
4

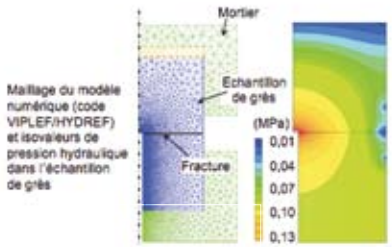
Mise en évidence de l'impact de la morphologie des épontes sur le comportement hydromécanique des fractures en suivant la distribution de l'espace des vides et des débits sectorisés au cours d'un essai (interprétation réalisée en partenariat avec le LAEGO de l'INPL).

Modification du dispositif expérimental du L3S pour l'évaluation des échanges fracture/matrice



Préparation et mise en place de l'échantillon





5

Mesure en laboratoire des échanges hydrauliques entre fracture et matrice sous sollicitation hydromécanique (essais réalisés en partenariat avec le L3S de Grenoble).

Un traitement de ces mesures a permis de déterminer l'orientation et la position des différentes fractures.
Les données de fracturation ont permis de construire un modèle à grande échelle du site de Coaraze (figure 2).
L'interprétation des pulses-tests de courte durée a fait l'objet d'une modélisation hydromécanique 3D en régime transitoire avec le logiciel 3DEC. Dans cette simulation, on impose la chronique de pression mesurée au point d'injection. La comparaison des valeurs mesurées et calculées (figure 3) montre que le modèle reproduit qualitativement les évolutions relatives des pressions hydrauliques (en HM2, à environ 1 mètre du point d'injection dans la fracture instrumentée) et des déplacements (en HM1 et HM2). Un ajustement des valeurs calculées sur les mesures permet de déterminer les caractéristiques hydromécaniques de la fracture. On détermine ainsi une ouverture hydraulique de 0,1 mm et une raideur normale de 15 GPa/m au point d'injection. Un tel ajustement, réalisé pour la même fracture à 1 mètre de ce point, donne des résultats qui varient du simple au double. Cela atteste de l'hétérogénéité des caractéristiques hydromécaniques de la fracture et de l'insuffisance d'une mesure ponctuelle de ces caractéristiques [3, 4].

ESSAIS DE LABORATOIRE

Le dispositif expérimental utilisé pour les essais de laboratoire permet de mesurer les variations de déplacements et de débits induits par une sollicitation hydromécanique. On mesure également la variation de la morphologie de la fracture au cours de l'essai. La répartition des vides entre les deux épontes de la fracture a été estimée, pour différents niveaux de sollicitation (figure 4), à partir d'une mesure de la rugosité initiale de chacune des épontes et de la mesure des variations du déplacement normal avec la contrainte normale. L'analyse directe (relation entre espace des vides et débits mesurés) et l'analyse indirecte (interprétation par modélisation numérique) ont mis en évidence la non-équivalence entre la variation de l'ouverture mécanique de la fracture (liée à sa rigidité) et la variation de son ouverture hydraulique (liée à sa perméabilité), en particulier sous forte contrainte normale effective. Faire cette hypothèse conduit, en effet, à prédire des débits bien plus faibles que ceux mesurés. Cette inégalité des variations est notamment liée à la rugosité des plans de fracture et à une chenalisation progressive des écoulements lorsque la contrainte normale augmente [5].
Le comportement de l'échantillon en double porosité (fracture + matrice poreuse) a également été étudié. Il a été préalablement nécessaire de faire évoluer ce dispositif expérimental de manière à pouvoir imposer, dans la fracture, une pression constante (ou contrôlée) pendant un temps suffisamment long pour permettre au fluide de diffuser dans la matrice poreuse. Les modifications ont consisté principalement à imperméabiliser l'orifice d'injection traversant verticalement la partie inférieure de l'échantillon fracturé et à mettre en place un système d'imperméabilisation amovible aux limites du joint (figure 5). Avec le collier amovible, on ne mobilise que la perméabilité

hydraulique matricielle (car la sortie de la fracture est obturée), tandis que, sans le collier amovible, on mobilise à la fois la perméabilité hydraulique matricielle et la conductivité hydraulique de la fracture. Dans un souci de qualifier le dispositif expérimental, les premiers essais ont été réalisés sur des échantillons de grès des Vosges provenant de la carrière de Bleuville. Cette roche a été choisie pour ses fortes valeurs de perméabilité et de porosité.
Plusieurs essais ont été réalisés pour caractériser successivement la conductivité hydraulique de la fracture, celle de la matrice poreuse ainsi que les échanges hydrauliques entre fracture et matrice. Les effets hydromécaniques couplés ont également été étudiés en faisant évoluer la sollicitation mécanique de l'échantillon (palier de contrainte normale).
Les résultats des essais ont été analysés par modélisation numérique en régime transitoire. Les codes VIPLEF/HYDREF (de l'École des Mines de Paris) utilisés tiennent compte de la double porosité de l'échantillon (fracture + matrice) et permettent de reproduire avec précision le chargement hydromécanique imposé. Les analyses montrent que le choix de la relation entre l'ouverture hydraulique de la fracture et la fermeture mécanique affecte fortement le débit simulé dans la fracture. Les écoulements dans la matrice peuvent également être légèrement affectés par l'ouverture hydraulique de la fracture. La réalisation de mesures simultanées des débits dans la fracture et la matrice devrait, à terme, permettre une évaluation globale de l'approche conceptuelle utilisée.

SUMMARY

LABORATORY AND IN SITU HYDRO-MECHANICAL CHARACTERIZATION OF POROUS AND FRACTURED MEDIA

Risk management related to underground mining (active or abandoned mines and quarries, rock slopes), waste repositories, greenhouse gas storage tanks, water, oil and natural gas resources, needs to be better understood in order to be able to predict the hydro-mechanical behaviour of fractured rock masses.
The scientific goals are both the evaluation of the mechanical stability of fractured rock masses and the prediction of fluid flows, given that these two aspects are closely linked. Indeed, the stability of a fractured rock mass depends on the fluid water pressure in the fractures and pores, whereas the permeability of a storage area is affected by the mechanical state of stress surrounding it.
The research undertaken by INERIS, in partnership with French university laboratories ("Géosciences-Azur" Laboratory, Nice;"Sols, Solides, Structures" Laboratory, Grenoble; "Environnement, Géomécanique & Ouvrages" Laboratory, Nancy), related to the improvement of the hydro-mechanical characterization of porous and fractured rock masses starting from in situ *experiments and laboratory tests.*
This improvement was made possible thanks to the development of new characterization tools and new interpretation and prediction methods based on numerical modelling.
The scientific assets relate to the evaluation of fracture flows and hydro-mechanical couplings from laboratory tests to in situ *experiments.*
A removable device, enabling hydraulic pressure and displacement measurements to be carried out, was developed in partnership with the Géosciences-Azur Laboratory. The device was used in a fractured limestone outcrop located close to the Coaraze village to the North of Nice in France (fig. 1). The experiments consisted in carrying out various pulse tests. In parallel, we developed and used numerical modelling (with 3DEC code) to reproduce and analyze the measurements, which led to questioning the Terzaghi hydro-mechanical relation and the cubic law for fracture fluid flows.
Laboratory tests were carried out on limestone samples from the Coaraze site and on sandstone samples from the Bleuville quarry in the Vosges region in France. The"3S" Laboratory has developed a device to study the hydro-mechanical behaviour of individual fractures on the laboratory scale (Fig. 1).This device was modified to measure the flow through porous rock mass samples as well. The results of the tests were analyzed by numerical modelling with the 3DEC and VIPLEF/HYDREF codes. The analyses show that the relation between the hydraulic aperture of the fracture and mechanical closure strongly impacts the fracture flow rate predictions. This was related to the fracture roughness evolution. The rock matrix flow rate can also be slightly affected by the fracture hydraulic aperture. The realization of simultaneous flow measurements in both fractures and the rock matrix should enable us to globally evaluate the conceptual approach used.

RÉFÉRENCES

[1] 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*, n° 113, pp. 41-51.
[2] 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 INERIS-DRS-05-66388/RN01, 15 décembre 2005.
[3] Cappa F., Guglielmi Y., Rutqvist J., Tsang C.F., Thoraval A. (2006). "Hydromechanical modelling of pulse tests that measure fluid pressure and fracture normal displacement at the Coaraze laboratory site - France". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 43, n° 7, pp. 1062-1082.
[4] Guglielmi Y., Cappa F., Rutqvist J., C-F Tsang, and Thoraval A. (2006). "Field and numerical investigations of free-water surface oscillation effects on rock slope hydromechanical behaviour - consequences for rock slope stability analyses". Proceedings of the GEOPROC2006 International symposium, HoHai University, Nanjing, China, 22-25 May, pp. 174-182.
[5] Lopez P., Rahmani I., Buzzi O., Boulon M., Thoraval A., Escudero-Rodriguez M. (2006). "Void space against fracture hydro mechanical behavior at sample scale", Van Cotthem A., Charlier R., Thimus J.F., Tshibangu J.P. (Eds.). Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mehanics. Proceedings of the international symposium Eurock 2006, 9-12 May, pp. 141-147.