

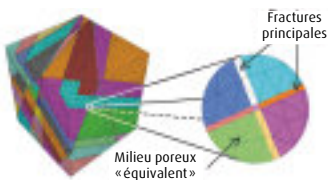
Caractérisation et prédiction du comportement hydromécanique des milieux rocheux fracturés

{ A. Thoraval }

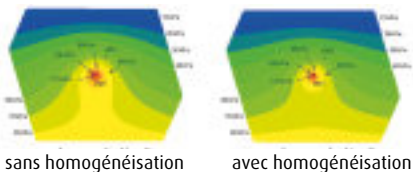
A - Essai d'injection réalisé sur le site de Coaraze, Alpes-Maritimes



B - Mise au point d'un modèle « double porosité » avec les logiciels 3DEC et FLAC3D



C - Impact de l'homogénéisation sur les pressions hydrauliques dans la fracture instrumentée



Caractérisation et prédiction du comportement des milieux fracturés *in situ*.

1

Le comportement mécanique, hydraulique et hydromécanique des fractures a été abondamment étudié durant ces trente dernières années et ce à divers titres (exploitation minière, stabilité des versants rocheux, stockage géologique). Il a ainsi clairement été établi que les paramètres géométriques (rugosité des épontes et répartition des zones en contact et des vides), les paramètres mécaniques (raideurs normale et tangentielle) et les paramètres hydrauliques (perméabilité ou ouverture hydraulique de la fracture) sont en lien direct avec les sollicitations qui se développent au niveau de ces zones « sensibles » (contraintes mécaniques et pressions hydrauliques).

L'INERIS a contribué à ces travaux en collaboration avec le laboratoire Sols, Solides, Structures (L3S) de l'Institut national polytechnique de Grenoble et le Laboratoire environnement, géomécanique & ouvrages (LAEGO) de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. Cette collaboration a conduit notamment à élaborer une procédure d'identification de la loi de couplage hydromécanique reliant l'ouverture hydraulique à la fermeture mécanique des fractures à partir d'essais de laboratoire. L'analyse de la morphologie des épontes de la fracture a également mis en évidence une relation entre cette loi et la variation de la surface de contact (ou d'écoulement) de la fracture avec la contrainte normale effective [Lopez *et al.*, 2007].

Les interactions entre le comportement hydromécanique des fractures et celui de la matrice rocheuse ont également été étudiées. Cette recherche a conduit au développement d'un dispositif expérimental,

permettant de caractériser le comportement hydromécanique, à la fois des fractures et de la matrice poreuse constituant les épontes de la fracture. L'appareillage dispose pour cela d'un système de récupération du fluide percolant à travers l'éponte supérieure de la fracture, ainsi qu'un système d'imperméabilisation amovible au niveau des limites du joint.

Après qualification du dispositif expérimental et validation des procédures d'identification à partir d'essais sur des échantillons de calcaire (provenant du site de Coaraze, Alpes-Maritimes) et de grès des Vosges (provenant de la carrière de Bleuville), les mesures réalisées en laboratoire ont servi de calage au développement d'un modèle numérique permettant de restituer fidèlement le comportement hydromécanique d'échantillons de grès fracturé et poreux soumis à une sollicitation normale et à un chargement hydraulique complexe [Souley *et al.*, 2007 & 2009].

Les travaux de laboratoire sont très utiles pour comprendre les relations entre les différents paramètres définissant le comportement hydromécanique des fractures. Toutefois, cette caractérisation faite sur des échantillons de taille nécessairement réduite n'est pas forcément représentative du comportement de la fracture à l'échelle du site étudié. C'est pourquoi l'INERIS a souhaité développer parallèlement des outils et des méthodes de caractérisation *in situ* des milieux rocheux fracturés.

Cette recherche a été conduite dans le cadre d'une collaboration avec le laboratoire Géoscience-Azur de l'Université de Nice sur le site de Coaraze, Alpes-Maritimes (figure 1A). Elle a

débouché sur la mise au point d'un dispositif amovible d'auscultation *in situ* du comportement hydromécanique des fractures permettant la réalisation de mesures simultanées de pression et de déplacement de haute précision [Cappa *et al.*, 2006] et la détermination, par calage de modèles numériques tridimensionnels, des caractéristiques hydromécaniques des fractures [Thoraval *et al.*, 2009].

En complément de ce travail, l'INERIS s'est également attaché à développer des méthodes de prédiction du comportement hydromécanique des milieux rocheux fracturés, et cela à différentes échelles. Cette recherche a conduit à élaborer des modèles numériques tridimensionnels, dit à « double porosité » (figure 1B), permettant de rendre compte simultanément du comportement hydromécanique d'un certain nombre de fractures considérées comme majeures, mais également de celui de la roche intacte ou d'un milieu équivalent constitué de la matrice et des fractures d'importance secondaire non introduites explicitement [Thoraval, 2009].

Si l'on s'intéresse à la prédiction de la stabilité ou des écoulements à très grande échelle, il

n'est pas envisageable en effet de prendre en compte toute la fracturation de manière explicite (pour des problèmes liés à la reconnaissance *in situ* de cette fracturation et aux limites des outils de modélisation). Il n'est d'ailleurs pas nécessaire de le faire. En effet, cette recherche a montré que le recours à l'homogénéisation (technique permettant de calculer les caractéristiques hydromécaniques d'un milieu continu poreux équivalent) rend possible une prédiction correcte du comportement hydromécanique global sans introduire explicitement toute la fracturation (figure 1C).

Ces travaux ont donc permis de progresser dans la compréhension théorique et pratique des lois régissant le couplage entre les déformations mécaniques et les écoulements au sein du massif en s'appuyant sur des essais innovants de laboratoire ainsi que sur différentes expérimentations *in situ*. Il est désormais possible d'envisager l'application de ces résultats à l'ensemble des problématiques relatives au champ d'expertise de l'INERIS (versants rocheux instables, carrières, mines, stockages).

ABSTRACT

During the last three decades, considerable efforts have been devoted to investigate and to characterize the hydromechanical behaviour of fractures. INERIS has participated to this research in collaboration with the Sols, Solides, Structures laboratory (L3S) from Institut National Polytechnique of Grenoble, the Environnement, Géomécanique & Ouvrages laboratory (LAEGO) from Institut National Polytechnique of Lorraine and Géoscience-Azur laboratory from Nice university. The main contributions concern the determination of relations between joint hydraulic opening and joint mechanical closure ; the improvement of a experimental device, previously used to characterize individual fractures at the laboratory scale, in order to also measure the flow through porous rock mass sample in addition to fracture flows ; the development of a removable device allowing the *in situ* fracture monitoring through the realization of simultaneous pressure and mechanical displacement measurements. Three-dimensional numerical approach was also developed to simulate at big scale the hydro-mechanical behavior of a fractured rockmass using explicit representation for the main fractures and up-scaling for the others. Thus, this work made it possible to progress in the theoretical and practical comprehension of the laws governing the coupling between the mechanical deformations and the flows within the fractured rock mass. From now, it is possible to consider the application of these results to various problems relating to the field of INERIS expertise as rock slope stability or underground cavern design.

RÉFÉRENCES

- 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*, 2006, vol. 43, N° 7, p. 1062-1082.
- Lopez P., Thoraval A., Rahmani I., Buzzi O., Boulon M., 2007. *Advance in constitutive modelling of jointed rock hydromechanical interaction at laboratory scale, Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXX, N° 1-2, 2008.
- 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, p. 327-330.
- Thoraval A., Guglielmi Y., Cappa F., 2009. *Caractérisation hydromécanique des fractures in situ - Apport de la modélisation numérique*, numéro à thème de la Revue française de géotechnique sur les « Discontinuités et joints dans les massifs rocheux » (à paraître prochainement).
- Thoraval A., 2009. *Analyse du comportement hydromécanique des milieux rocheux fracturés à double porosité*, Rapport de recherche INERIS référencé DRS-09-66395-01896A.