



**HAL**  
open science

# Modélisation du comportement hydromécanique d'un versant calcaire poreux et fracturé – Impact de simplifications géométriques et d'une homogénéisation des propriétés hydromécaniques sur la qualité des prédictions

Alain Thoraval, Frédéric Cappa, Yves Guglielmi

## ► To cite this version:

Alain Thoraval, Frédéric Cappa, Yves Guglielmi. Modélisation du comportement hydromécanique d'un versant calcaire poreux et fracturé – Impact de simplifications géométriques et d'une homogénéisation des propriétés hydromécaniques sur la qualité des prédictions. *Revue française de Géotechnique*, 2016, 147, pp.3. 10.1051/geotech/2016007. hal-03355036

**HAL Id: hal-03355036**

**<https://hal.science/hal-03355036v1>**

Submitted on 27 Sep 2021

**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.

# Modélisation du comportement hydromécanique d'un versant calcaire poreux et fracturé – Impact de simplifications géométriques et d'une homogénéisation des propriétés hydromécaniques sur la qualité des prédictions

Alain Thoraval<sup>1,\*</sup>, Frédéric Cappa<sup>2</sup> et Yves Guglielmi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), Parc de Saurupt, CS 14234, 54042 Nancy, France

<sup>2</sup> Université Côte d'Azur, CNRS, OCA, IRD, Géoazur (UMR 7329), France

<sup>3</sup> Lawrence Berkeley National Laboratory, Earth and Environmental Science Area, 1 Cyclotron road, M/S 74R316C, Berkeley, CA 94720, USA

**Résumé** – Cet article présente une analyse numérique de résultats d'essais d'injection et de pompage réalisée dans le site laboratoire de Coaraze avec mesures simultanées en forage de variations de pressions hydrauliques et de déformations. Le site de Coaraze est un petit réservoir calcaire poreux et fracturé (échelle décimétrique) qui affleure à une trentaine de kilomètre au nord de Nice. Nous avons développé des approches tridimensionnelles pour simuler le comportement hydromécanique des fractures les plus importantes couplé avec celui d'un milieu poreux équivalent représentant la matrice rocheuse intacte et les autres fractures. Nous avons, en particulier, évalué l'impact de simplifications géométriques et d'homogénéisations sur la qualité des prédictions du comportement hydromécanique du réservoir durant les expérimentations. Inclure dans le modèle uniquement les fractures "clés", jouant un rôle important hydrauliquement et/ou mécaniquement, s'avère aussi efficace qu'exécuter une homogénéisation prenant en compte l'ensemble des fractures.

**Mots clés** : couplage hydromécanique / roche fracturée poreuse / mesures *in situ* / homogénéisation / 3DEC / FLAC3D

**Abstract** – Modelling of hydromechanical behavior of a porous and fractured limestone slope – Impact of geometric simplifications and hydromechanical properties upscaling on the quality of predictions. This paper presents a numerical analysis of *in situ* well injection and pumping experiments carried out at the Coaraze Laboratory site with simultaneous fluid pressure and rock deformation measurements in boreholes. The Coaraze site is a small fractured and porous carbonate reservoir (decimetric scale) that outcrops 30 km north of Nice. We have developed three-dimensional numerical approaches to simulate the hydromechanical behavior of major fractures and the surrounding equivalent continuous and porous medium that represents the intact rock and the other fractures. We have particularly focused on evaluation of the impact of geometrical simplifications and upscaling on the quality of the prediction of the reservoir hydromechanical behavior during hydraulic experiments. Including in the model a few "key" fractures that have important roles in fluid flow and deformation are shown to be as efficient as performing an upscaling of the fracture network.

**Keywords**: hydromechanical couplings / fractured porous rock / *in situ* measurements / upscaling / 3DEC / FLAC3D

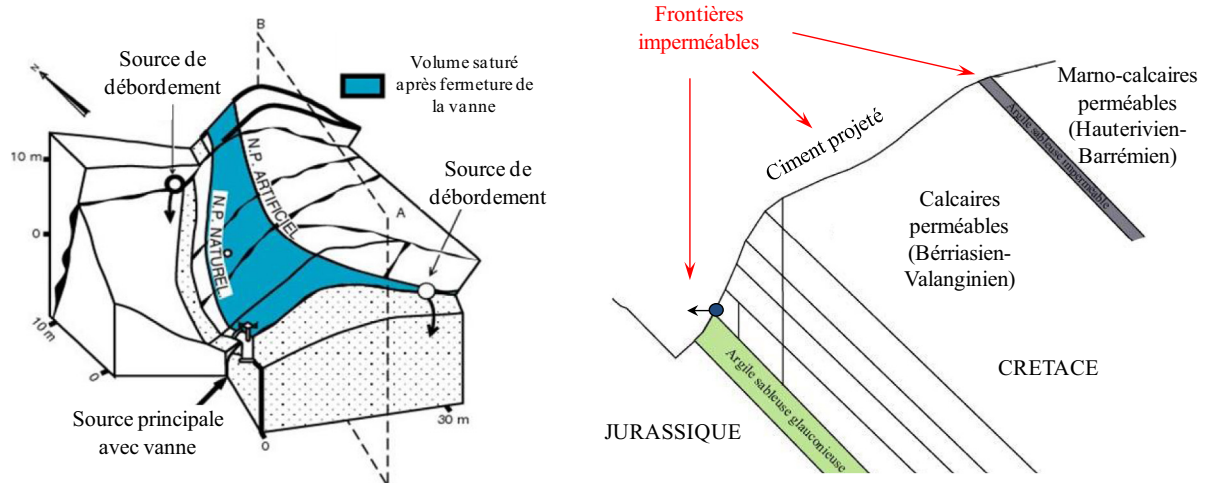
## 1 Introduction

La recherche sur les circulations de fluides dans les milieux poreux et fracturés a connu ces dernières décennies un essor croissant motivé par des enjeux de sécurité et d'efficacité liés à la réalisation d'ouvrages en souterrain (mines et carrières,

stockages) et à la surface du sol (fronts rocheux, barrages). Ces ouvrages sont notamment liés à la problématique de l'enfouissement des déchets (nucléaires, industriels et ménagers), de la production ou du stockage d'énergie, ou encore de la lutte contre les effets de serre (stockage du CO<sub>2</sub>).

La stabilité mécanique et le régime d'écoulement des eaux souterraines sont affectés par le comportement hydraulique des terrains. Or, ce dernier est régi par l'état de fracturation du massif rocheux, mais aussi par la porosité et la perméabilité de la matrice rocheuse.

\* Auteur correspondant : [alain.thoraval@ineris.fr](mailto:alain.thoraval@ineris.fr)



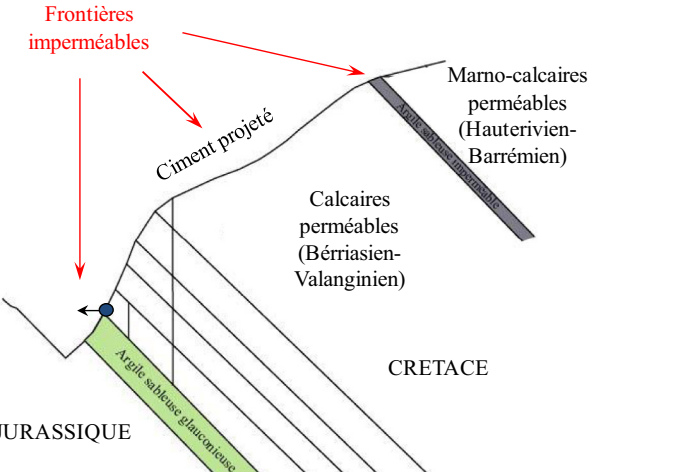
**Fig. 1.** Schématisation du site expérimental de Coaraze (Guglielmi, 1999).  
**Fig. 1.** Description of Coaraze experimental site (Guglielmi, 1999).

On conçoit l'intérêt de prendre en compte ces deux aspects, aussi bien lors d'expérimentations en laboratoire ou *in situ* que dans une modélisation. Des tentatives existent notamment dans le domaine du génie pétrolier, mais le concept de massif rocheux à double porosité a rarement été employé en géotechnique appliquée aux ouvrages souterrains.

Dans le cadre de cet article, on considérera le milieu rocheux comme la superposition d'un réseau de fractures dite « principales » (ou « clés ») et d'un « milieu poreux continu équivalent ». Ce milieu « équivalent » doit rendre compte indirectement du comportement hydromécanique des fractures secondaires et de la matrice. Les caractéristiques hydromécaniques du milieu équivalent doivent être évaluées par des techniques dites d'homogénéisation (ou d'« upscaling »). Cette approche est motivée notamment par la difficulté de prendre en compte explicitement dans un modèle l'ensemble des hétérogénéités existantes dans le milieu naturel (Blum *et al.*, 2009 ; Pouya et Fouché, 2009).

Ces caractéristiques équivalentes sont déterminées selon une démarche d'homogénéisation numérique mise au point antérieurement (Ababou, 1991 ; Min *et al.*, 2004 ; Oda, 1986 ; Thoraval et Renaud, 2004). Il s'agit tout d'abord d'identifier la géométrie de chacun des « blocs » à homogénéiser (matrice découpée par des fractures secondaires). On calcule ensuite, par simulations numériques, la réponse de ces « blocs » à différents chargements hydromécaniques, de sorte à déterminer les tenseurs de perméabilité et de rigidité d'un milieu poreux continu « équivalent » au milieu fracturé considéré.

La mise en œuvre de ce type de modèle nécessite de répondre préalablement aux questions suivantes : quelles sont les fractures « clés » à considérer pour un site donné (du point de vue de la prédiction des écoulements ou des mouvements de terrain) ? Quel écart observe-t-on dans les prédictions suivant que les fractures supplémentaires sont introduites explicitement, ou à travers une représentation de type « milieu poreux continu équivalent » ? La prise en compte du comportement poromécanique de la matrice rocheuse affecte-t-il significativement la réponse du modèle, ou est-il possible de le négliger ?



Dans la présente étude, nous avons examiné l'impact de diverses simplifications sur la prédiction du comportement hydromécanique d'un massif rocheux fracturé et poreux soumis à des sollicitations hydrauliques. Une approche numérique tridimensionnelle a été développée prenant en compte à la fois le comportement hydromécanique de la matrice rocheuse poreuse et des fractures. Le résultat des simulations a été comparé avec les mesures expérimentales réalisées lors de tests d'injection et de pompage de longue durée effectués dans le site de Coaraze (Cappa, 2006 ; Cappa *et al.*, 2005 ; Guglielmi, 1999). L'analyse des différentes options de modélisation réalisées nous conduit à préciser certaines recommandations méthodologiques.

## 2 Choix d'un jeu de données pertinent pour l'étude méthodologique

### 2.1 Présentation du site expérimental

L'étude que nous présentons ici est basée sur des expérimentations réalisées sur le site localisé à proximité du village de Coaraze à 30 km au nord de Nice. Il est situé en rive gauche d'un petit vallon orienté N40. Le vallon marque la limite entre les calcaires du Jurassique en rive droite et les faciès du Crétacé, en rive gauche (Fig. 1). Trois faciès lithostratigraphiques peuvent être distingués dans le Crétacé (Guglielmi, 1999) :

- un faciès calcaire basal Bérriasien-Valanginien, séparé des calcaires jurassiques par un niveau argilo-sableux glauconieux de 1,5 m d'épaisseur ;
- un faciès marno-calcaire Hauterivien-Barrémien à nouveau séparé du précédent par un niveau argilo-sableux glauconieux de 2 m d'épaisseur ;
- un faciès marneux avec de fines intercalations calcaires d'âge cénomaniens.

La partie nord-est du site correspond à une structure monoclinale, réglée par la direction N40-45° et le pendage 45-50°SE des couches. Cette zone est recoupée par une faille

inverse N50° à N80°, 70°N dont le rejet correspond à un abaissement relatif du compartiment sud par rapport au compartiment nord. Dans la partie sud-est du site, les couches sont intensément découpées par des failles de direction moyenne N140° et de pendage subvertical à 80°NE. Ces failles délimitent des lentilles tectoniques de 10–15 m de long qui correspondent à des compartiments de plus en plus abaissés vers l'aval du vallon. À l'extrême sud-ouest de la zone, le vallon recoupe un contact majeur du Jurassique sur le Cénomaniens.

Ce site a été choisi pour l'étude *in situ* des processus hydromécaniques dans des roches carbonatées fracturées (Guglielmi, 1999). Il correspond à un petit réservoir fracturé (30 m × 30 m) dans un affleurement de surface qui est constituée d'une succession de bancs calcaire à faible porosité sur 15 m d'épaisseur. Les limites hydrauliques du réservoir sont bien définies, avec des couches imperméables à sa base et son sommet (couche d'argile sableuse – voir Fig. 1), une faille imperméable située en aval vers le sud-ouest (de direction N140°). En amont, vers le Nord, une faille perméable permet d'alimenter en continu le réservoir qui est, par ailleurs, drainé par une source située à sa base. Cette source a été équipée d'une vanne qui permet le contrôle du niveau piézométrique dans le réservoir (Fig. 1).

Lors de la mise en charge, la quasi-absence de réaction d'un piézomètre situé dans le banc glauconieux basal prouve l'imperméabilité de ce niveau. Quand le niveau piézométrique monte, une source temporaire apparaît au toit des calcaires sous le contact avec le deuxième niveau glauconieux sommital. Ce deuxième niveau joue donc aussi un rôle d'imperméable. L'aquifère est donc bien délimité dans les calcaires perméables bérriasiens-valangiens situés entre les deux niveaux imperméables glauconieux. Pour provoquer une mise en charge suffisante dans ces calcaires, toutes les petites fissures du versant situées en rive gauche du vallon ont été colmatées par du ciment. Ce versant joue donc le rôle d'une limite imperméable sur une dizaine de mètres de hauteur au-dessus de la source.

## 2.2 Description de la fracturation du site

Les études préliminaires menées sur le site par Guglielmi (1999) ont montré que le réseau de fractures du site de Coaraze se compose de trois familles principales de fractures : trois failles, espacées de 2 à 3 m, ayant un azimut N50 à N70 et un pendage de 70 à 90° vers le NW ; onze failles ayant un azimut N120 à N140, un pendage de 75 à 90° vers le NE et environ 2 m d'espacement ; douze plans de stratification ayant un azimut N40, un pendage de 45° vers le SE et un espacement de 0,5 à 1,0 m.

Des relevés complémentaires ont été réalisés à cette fin, 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 X, Y et Z de points positionnés sur les traces visibles des fractures sur le versant. Près de 500 mesures (visées) ont été réalisées, sachant que certaines fractures ont été caractérisées par plus de 20 points. Chaque campagne de mesure a permis l'amélioration progressive du modèle géométrique, les nouvelles mesures étant souvent conditionnées par la confrontation périodique du modèle avec les observations de terrain. Le résultat final est une

cartographie tridimensionnelle exhaustive des principales fractures découpant le réservoir.

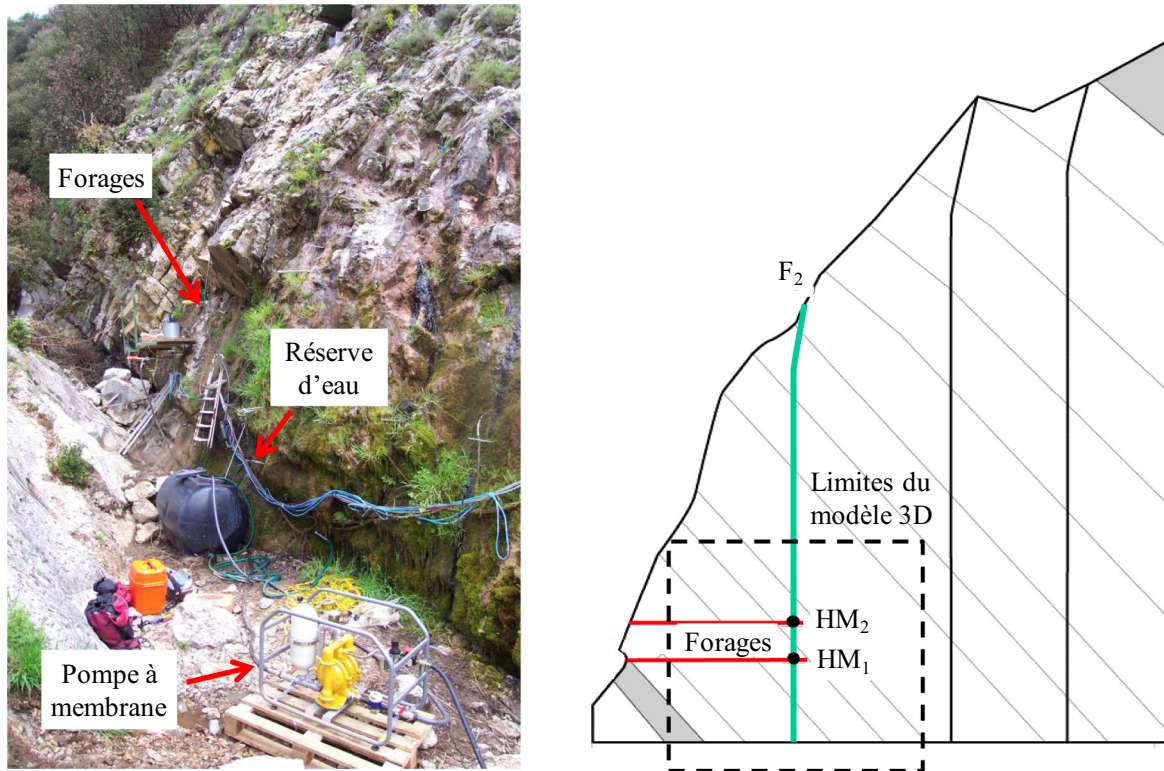
## 2.3 Description des essais réalisés et des mesures hydromécaniques retenues pour l'étude

Le premier type d'expérimentation a consisté à imposer une sollicitation globale au massif par fermeture de la vanne installée en pied de versant (Fig. 1). 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. Il apparaît notamment que la pression d'eau se stabilise en moins de 30 minutes dans les fractures les plus conductrices (cette stabilisation est plus lente dans les blocs, moins perméables, découpés par ces fractures). Les résultats de cette expérimentation et leur interprétation sont décrits dans (Cappa *et al.*, 2005). Des compléments d'interprétation sont apportés par Guglielmi *et al.* (2008) où il apparaît que la réponse du modèle global est très sensible à la prise en compte explicite des discontinuités subverticales présentes sur le site. L'homogénéisation des autres fractures (y compris des plans de stratification) par un milieu continu équivalent est largement acceptable, les fractures verticales expliquant 90 % des mesures réalisées. Toutefois, cette représentation peut conduire à des erreurs importantes localement.

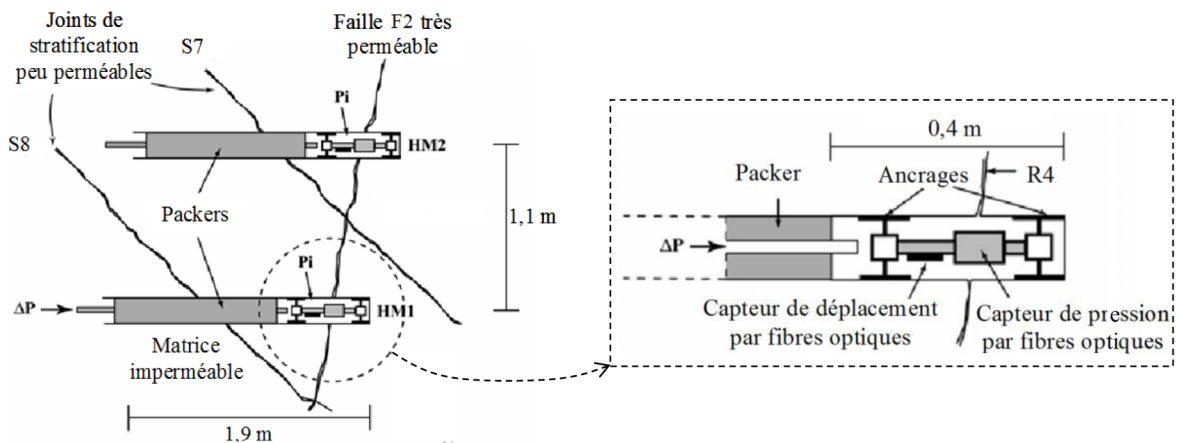
Le deuxième type consiste à imposer une sollicitation plus locale en réalisant un essai d'injection dans une faille subverticale F<sub>2</sub> (Fig. 2). On impose une pression ou un débit dans une fracture et on mesure les variations des pressions hydrauliques et des déplacements normaux au plan de fracture, induites par la sollicitation. Cela a nécessité la réalisation préalable de deux forages horizontaux, espacés d'environ 1 m, recoupant la fracture choisie. On distingue des injections de courte durée (« pulse » quelques secondes) et des essais de pompage et d'injection de plus longue durée (succession de paliers de 30 minutes à une heure). 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 les expérimentations sont réalisées en condition hydraulique saturée (correspondant à l'état d'équilibre du site à vanne fermée). En ce qui concerne les expérimentations

Dans chaque forage, la faille a été isolée avec un packer gonflable (Fig. 3), afin de créer une section isolée de 0,4 m de long. Le dispositif de mesure est composé des capteurs à fibre optique mesurant simultanément la pression de l'eau et le déplacement normal de la faille. Ce dispositif a été adapté à partir de l'appareil BOF-EX développé par RocTest-Telemacs (Cappa *et al.*, 2006). Le dispositif de mesure est capable de réaliser des mesures à haute fréquence [120 Hz] et avec une grande précision ( $\pm 1$  kPa pour la pression et  $\pm 10^{-7}$  m pour le déplacement).

Nous avons rassemblé (Tab. 1) les mesures obtenues dans la fracture en HM<sub>1</sub> et HM<sub>2</sub> au cours des essais de pompage et d'injection par paliers de longue durée qui seront utilisés dans cet article. Les valeurs imposées sont les valeurs en gras, soit la première colonne (débit) dans le cas des essais de pompage et la deuxième colonne (pression) dans le cas des essais d'injection. Les autres valeurs, mesurées *in situ*, sont induites par la sollicitation.



**Fig. 2.** Description des expérimentations d’injection et de pompage au sein de la fracture verticale  $F_2$ .  
**Fig. 2.** Description of the experimental device used for local injections or pumping within fracture  $F_2$ .



**Fig. 3.** Sonde de mesure mise en place dans les forages pour mesurer la pression hydraulique et les déplacements normaux dans la faille  $F_2$ .  
**Fig. 3.** Experimental device inserted into the boreholes to measure hydraulic pressure and normal displacements within the fault  $F_2$ .

La pression hydraulique indiquée est une variation de pression par rapport à un état initial de 43 kPa en  $HM_1$  et de 33 kPa en  $HM_2$  :

- il faut imposer un débit de pompage de 0,77 l/s pour que la pression s’annule en  $HM_1$  (elle vaut alors 22 kPa en  $HM_2$ ). Le pompage induit des déplacements normaux (fermeture) maximaux de 0,9 mm en  $HM_1$  et de 0,2 mm en  $HM_2$  ;
- les paliers de pressions imposées au cours de l’essai d’injection induisent des débits injectés respectifs d’environ 0,7 l/s et 1,2 l/s en  $HM_1$  et des déplacements normaux (ouverture) respectifs de  $1 \mu\text{m}$  et  $2,35 \mu\text{m}$ . Seule la

variation de pression induite a pu être mesurée en  $HM_2$ , le capteur de déplacement étant temporairement hors d’usage.

### 3 Construction de modèles numériques pour représenter les essais d’injection/pompage par paliers de longue durée

La démarche a consisté à construire, dans un premier temps, un modèle géométrique de petite taille (cube de 8 m de côté dont la projection est représenté sur la Fig. 2) autour du

**Tableau 1.** Mesures faites à l'intersection (HM<sub>1</sub> et HM<sub>2</sub>) de la fracture F<sub>2</sub> avec les forages au cours des essais d'injection et de pompage par paliers.**Table 1.** Measurements done at the intersections (HM<sub>1</sub> and HM<sub>2</sub>) of fracture F<sub>2</sub> with the boreholes during the multi-stage injection or pumping tests.

	Valeurs mesurées en HM <sub>1</sub>			Valeurs mesurées en HM <sub>2</sub>	
	Débit (l/s)	Variation de la pression hydraulique (kPa)	Variation du déplacement normal (μm)	Variation de la pression hydraulique (kPa)	Variation du déplacement normal (μm)
	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	<b>-0,05</b>	-1	0	0	0
	<b>-0,44</b>	-17	-0,46	-4,4	-0,1
	<b>-0,51</b>	-23,5	-0,58	-6	-0,12
Pompage	<b>-0,55</b>	-25	-0,62	-6,1	-0,13
(9 paliers	<b>-0,77</b>	-43	-0,9	-11	-0,21
de débit)	<b>-0,55</b>	-25	-0,64	-6,1	-0,12
	<b>-0,52</b>	-25	-0,63	-6	-0,12
	<b>-0,46</b>	-21,5	-0,57	-5	-0,11
	<b>-0,09</b>	-2	-0,04	-0,5	-0,01
Injection	0	<b>0</b>	0	0	
(2 paliers	0,69	<b>36</b>	1	28	Pas de mesure
de pression)	1,19	<b>78</b>	2,35	74	

point d'injection (HM<sub>1</sub>) à partir des mesures de fracturation faites sur le terrain. Les fractures introduites dans ce modèle géométrique sont :

- la fracture instrumentée F<sub>2</sub> qui est sollicitée (elle intersecte les deux sondages HM<sub>1</sub> et HM<sub>2</sub> respectivement à 4,4 m et 4,6 m du versant) ;
- les joints de stratifications S<sub>10</sub>, S<sub>9</sub>, S<sub>8</sub> et S<sub>7</sub> ;
- les diaclases R<sub>20</sub> (localisée en dessous de S<sub>9</sub> et limitée par celle-ci), R<sub>9b</sub> (localisée au-dessus de S<sub>9</sub> et limitée par celle-ci) et R<sub>9a</sub> (non limitée), R<sub>10b</sub> (localisée au-dessus de S<sub>9</sub> et limitée par celle-ci) ; J<sub>1</sub> (comprise entre S<sub>6</sub> et S<sub>7</sub>), J<sub>2</sub> (comprise entre S<sub>6</sub> et S<sub>7</sub>) et D<sub>6</sub> (non limitée).

Un modèle hydromécanique a ensuite été conçu à partir de ce modèle géométrique. Nous avons tout d'abord privilégié une *approche discrète* en faisant l'hypothèse que les écoulements se produisaient uniquement à travers les fractures prises en compte dans le modèle. Nous avons ensuite développé une *approche mixte*, où seules les fractures principales sont prises en compte explicitement, les fractures secondaires et la matrice poreuse étant représentées par un milieu poreux équivalent. Cela a nécessité l'utilisation d'une méthode d'homogénéisation pour calculer les tenseurs de perméabilité et de rigidité de ce milieu poreux équivalent. Le nouveau modèle a permis d'évaluer l'impact de la porosité matricielle et des fractures secondaires sur la simulation des expérimentations locales.

### 3.1 Modèle hydromécanique 3DEC ne prenant en compte que la porosité des fractures

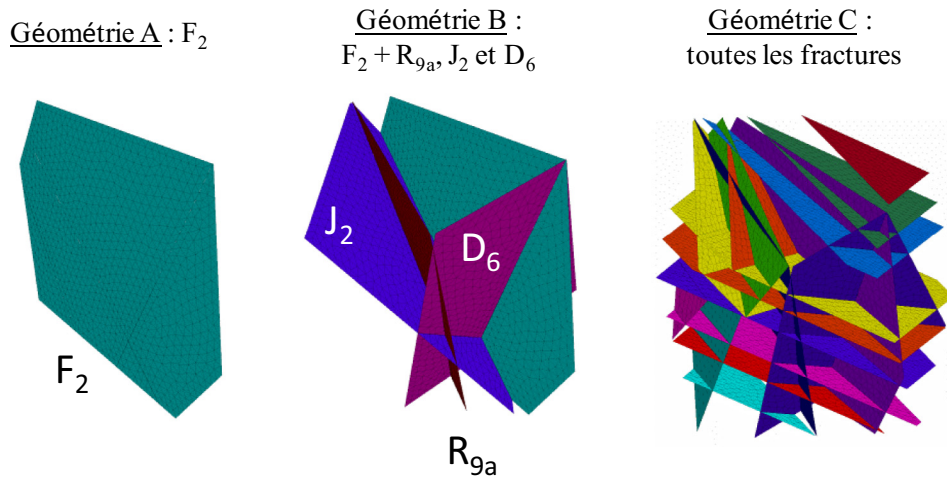
Peut-on négliger d'introduire dans le modèle les fractures autour de la fracture instrumentée ? Quelles erreurs de prédiction commet-on si l'on n'introduit pas les joints de

stratification (moins perméables que les autres fractures), si l'on n'introduit aucune autre fracture que la fracture instrumentée ? Pour répondre à ces questions, trois variantes ont été considérées (Fig. 4). Ces variantes se distinguent par le nombre de fractures introduites dans le modèle : (géométrie A) uniquement la fracture instrumentée (F<sub>2</sub>) ; (géométrie B) la fracture F<sub>2</sub> et les diaclases qui l'intersectent, à savoir : R<sub>9a</sub>, J<sub>2</sub> et D<sub>6</sub> ; (géométrie C) toutes les fractures identifiées.

#### 3.1.1 Description du modèle 3DEC

Les simulations ont été réalisées en utilisant la version 4.10 de logiciel 3DEC (Itasca Consulting Group Inc., 1994). La matrice rocheuse et les fractures sont supposées avoir un comportement élastique. La variation de la rigidité de la fracture est supposée être négligeable au cours de l'essai (en raison de la faible amplitude du déplacement mesuré).

3DEC permet de simuler le comportement hydromécanique d'une matrice rocheuse déformable et imperméable découpée par des fractures supposées saturées en eau. L'écoulement dans les fractures est considéré comme laminaire, et il est régi par la loi cubique (Witherspoon *et al.*, 1980). Les calculs hydromécaniques supposent une relation entre les variations d'ouverture hydrauliques de fracture ( $a - a_0$ ) et la variation de fermeture mécanique ( $\Delta u_n$ ), où  $a_0$  est l'ouverture hydraulique à l'état initial avant l'essai, et où la variation de fermeture mécanique ( $\Delta u_n$ ) est obtenue en divisant la variation de contrainte effective normale (de  $\Delta \sigma_n'$ ) par la raideur normale de la fracture (kN). La variation de la contrainte normale effective est obtenue en soustrayant la variation de la pression hydraulique à la variation de la contrainte normale totale, selon la loi de Terzaghi (1923).



**Fig. 4.** Géométries modélisées par le code 3DEC : (a) géométrie A (fracture  $F_2$  seule) ; (b) géométrie B (fractures  $F_2$ ,  $R_{9a}$ ,  $J_2$ ,  $D_6$ ) ; (c) géométrie C (toutes les fractures – cas de référence).

**Fig. 4.** 3DEC model geometries: (a) Geometry A (fracture  $F_2$  only); (b) Geometry B (fractures  $F_2$ ,  $R_{9a}$ ,  $J_2$ ,  $D_6$ ); (c) Geometry C (all the fractures – reference case).

Les valeurs des données d'entrée du modèle ont été ajustées de sorte à restituer au mieux les mesures de déplacement et de pression :

- propriétés de la matrice rocheuse : densité ( $\rho$ ) = 2400 kg/m<sup>3</sup>, module d'Young (E) = 40 GPa, le coefficient de Poisson ( $\nu$ ) = 0,3 ;
- propriétés de la fracture : rigidité normale ( $k_n$ ) = 5 GPa/m pour les fractures sub-verticales et 50 GPa/m pour les joints de stratification (raideurs tangentielles ( $k_s$ ) dix fois plus faibles), ouvertures hydraulique ( $a_0$ ) =  $5 \times 10^{-4}$  m pour la fracture de la sub-verticale et  $10^{-4}$  m pour les joints de stratification.

### 3.1.1.1 État hydraulique initial

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<sub>1</sub>. Le « petit » modèle, utilisé ici pour interpréter les essais d'injection/pompage, 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<sub>1</sub> et 33 kPa en HM<sub>2</sub>).

### 3.1.1.2 État mécanique initial

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 en 2D à grande échelle du type de celui présenté dans Guglielmi *et al.* (2008). Les variations spatiales de l'état de contrainte dans le grand modèle prennent en compte les effets gravitaires et la proximité au versant (nous n'avons pas pris en compte d'éventuels effets liés à la tectonique locale). 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. On considère en particulier que la contrainte totale initiale normale à la fracture instrumentée ( $F_2$ ) vaut environ 120 kPa en HM<sub>1</sub> et 93 kPa en HM<sub>2</sub>. La contrainte effective initiale normale à cette fracture vaudrait donc, selon la relation de Terzaghi,  $120 - 45 = 75$  kPa en HM<sub>1</sub> et  $93 - 33 = 60$  kPa en HM<sub>2</sub>.

### 3.1.1.3 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 modèle, les conditions aux limites n'avaient pas d'effet significatif sur les résultats.

### 3.1.1.4 Sollicitations imposées

Elles consistent en une succession de valeurs de pression (essais d'injection) ou de débit (essais de pompage) au point d'intersection du sondage HM<sub>1</sub> avec la fracture  $F_2$ . Les simulations hydrauliques et hydromécaniques sont une succession de calculs en régime permanent (un calcul par palier de débit ou de pression). Pour atteindre l'équilibre, 3DEC réalise un certain nombre de cycles hydrauliques. Dans le cas des calculs hydromécaniques, un certain nombre de cycles mécaniques (dits de relaxation), lié à la méthode explicite, est également réalisé afin d'obtenir un équilibre mécanique à chaque cycle hydraulique.

## 3.1.2 Résultats du modèle de référence

Les variations calculées aux points HM<sub>1</sub> et HM<sub>2</sub> pour le cas de référence (géométrie C) sont données dans le Tableau 2. Une comparaison des valeurs calculées avec les mesures montre que le modèle prédit correctement le débit en HM<sub>1</sub> lorsqu'une pression hydraulique est imposée, et réciproquement la

**Tableau 2.** Simulation des essais d'injection et de pompage par paliers avec 3DEC (modèle C – cas de référence) – Débits, variation de pressions hydrauliques et de déplacements normaux calculées à l'intersection (HM<sub>1</sub> et HM<sub>2</sub>) de la fracture F<sub>2</sub> avec les forages (en gras : sollicitation imposée).

**Table 2.** Simulation of multi-stage injection or pumping tests with 3DEC (model C – reference case) – Flow rates, hydraulic pressure and normal displacement variations calculated at the intersections (HM<sub>1</sub> and HM<sub>2</sub>) of fracture F<sub>2</sub> with the boreholes (in bold: imposed stress).

Géométrie C (toutes les fractures)	Valeurs calculées en HM <sub>1</sub>			Valeurs calculées en HM <sub>2</sub>	
	Débit (l/s)	Variation de la pression hydraulique (kPa)	Variation du déplacement normal (μm)	Variation de la pression hydraulique (kPa)	Variation du déplacement normal (μm)
Pompage (paliers 2, 4 et 5)	<b>-0,44</b>	-26,34	-0,95	-5,6	-0,31
	<b>-0,55</b>	-32,92	-1,18	-7,0	-0,40
	<b>-0,77</b>	-45	-1,62	-9,6	-0,55
Injection (2 paliers)	+0,61	<b>+36</b>	+1,31	+7,8	+0,44
	+1,33	<b>+78</b>	+2,84	+16,9	+0,96

pression en HM<sub>1</sub> lorsqu'un débit est imposé (écart inférieur à 12 %). Les déplacements normaux en HM<sub>1</sub> sont également prédits de façon satisfaisant dans le cas des essais d'injection à pression imposée (écart inférieur à 20 %). Sur ce point, les résultats sont moins satisfaisants dans le cas des essais de pompage à débit imposé (écart de 80 %). Cela pourrait être lié à la non prise en compte dans le modèle de la diminution de la raideur normale de la fracture (kn) qui devrait accompagner la diminution de la contrainte normale effective, comme cela a été mise en évidence en laboratoire à partir d'échantillon prélevé sur le site (Lopez *et al.*, 2007 ; Thoraval, 2005). Les variations de pression hydraulique en HM<sub>2</sub> sont correctement prédites dans le cas des essais de pompage à débit imposé (écart inférieur à 13 %). Toutefois, ces pressions sont fortement sous-estimées dans le cas des essais d'injection à pression imposée. Cela pourrait être lié à un effet de la condition à la limite hydraulique (pression supposée constante) qui, en raison de la taille assez réduite du modèle, pourrait réduire artificiellement la variation de pression en HM<sub>2</sub>.

Si les résultats obtenus sont acceptables sur certain point, il apparaît donc qu'il faudrait vraisemblablement reconsidérer certaines hypothèses du modèle (taille réduite du modèle, condition aux limites hydrauliques, raideurs des fractures supposée constante) pour obtenir des résultats totalement satisfaisants. Compte tenu des objectifs plutôt méthodologiques de cet article (et de l'importance des temps de calcul), nous avons toutefois estimé que le modèle pouvait être utilisé dans l'état pour une première évaluation des effets des simplifications géométriques (non prise en compte de certaine fracture, homogénéisation). Il reste à vérifier l'impact de ces hypothèses sur les conclusions, notamment dans le cadre de sollicitation hydraulique de plus longue durée (la durée total des expérimentations ne dépasse pas ici quelques heures – voir Sect. 2.3) où la taille du modèle devrait être augmenté.

### 3.1.3 Effet d'une réduction du nombre de fractures dans le modèle 3DEC

Trois simulations ont été réalisées selon les géométries décrites sur la Figure 4 : géométrie A (fracture F<sub>2</sub> seule), géométrie B (fractures F<sub>2</sub>, R<sub>9a</sub>, J<sub>2</sub>, D<sub>6</sub>), géométrie C (toutes les

fractures – cas de référence). La Figure 5 montre les iso-valeurs de pressions hydrauliques (a, b et c) et de déplacement normaux (d, e et f) dans le plan de la fracture F<sub>2</sub>. On constate logiquement une diminution de la pression hydraulique maximale lorsque la fracture F<sub>2</sub> est connectée à d'autres fractures. Les fractures environnantes ont également un impact sur les déplacements normaux de la fracture F<sub>2</sub> ; on voit clairement, en effet (Figs. 4e et 4f) des discontinuités de déplacement de part et d'autre des traces des fractures complémentaires dans le plan de la fracture F<sub>2</sub>.

On a comparé les valeurs de pressions hydrauliques, de déplacements normaux et de débits aux points HM<sub>1</sub> et HM<sub>2</sub> (Fig. 2). On précise ci-après les écarts de prédictions obtenus avec la géométrie « une seule fracture » (géométrie A) relativement à la géométrie « toutes les fractures » (géométrie C) :

- lorsque l'on impose la pression au sein de la fracture F<sub>2</sub> (en HM<sub>1</sub>), on calcule les écarts suivants : débit en HM<sub>1</sub> (-15 %) ; pression en HM<sub>2</sub> (+37 %) ; déplacements normaux en HM<sub>1</sub> (-3 %) et en HM<sub>2</sub> (+23 %) ;
- lorsque l'on impose un débit au sein de la fracture F<sub>2</sub> (en HM<sub>1</sub>), on calcule les écarts suivants : pression en HM<sub>1</sub> (+16 %) et en HM<sub>2</sub> (+60 %). déplacements normaux en HM<sub>1</sub> (-13 %) et en HM<sub>2</sub> (-40 %).

Les différences entre les géométries B et C sont moins importantes que les différences entre les géométries A et C. En effet, pour le débit, les variations de pression hydraulique et les variations de déplacement normal, l'écart reste inférieur à 3 % en HM<sub>1</sub> et à 15 % en HM<sub>2</sub>.

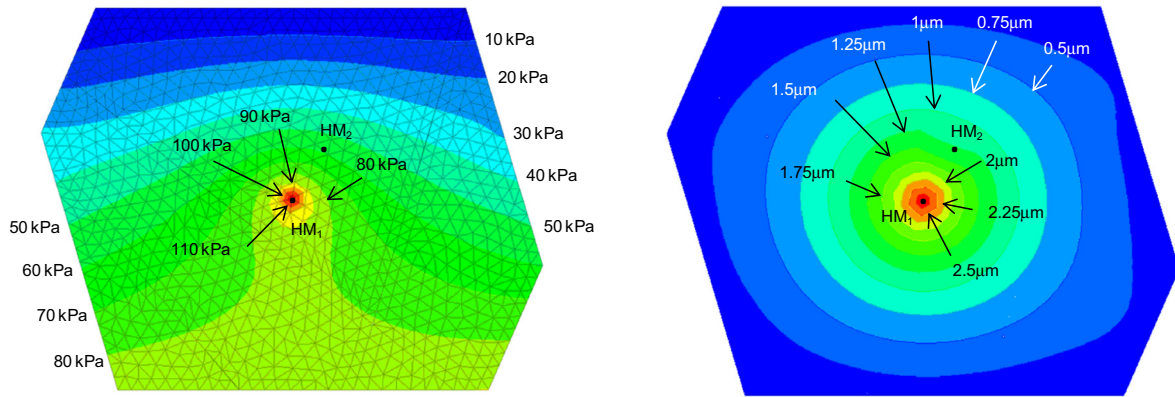
Ces données montrent qu'une simplification excessive de la géométrie du modèle (en ne considérant que la fracture principale instrumentée F<sub>2</sub>) peut avoir un impact important sur la réponse hydromécanique et induire des écarts de prédiction importants.

### 3.2 Développement d'un modèle hydromécanique à double porosité avec FLAC3D

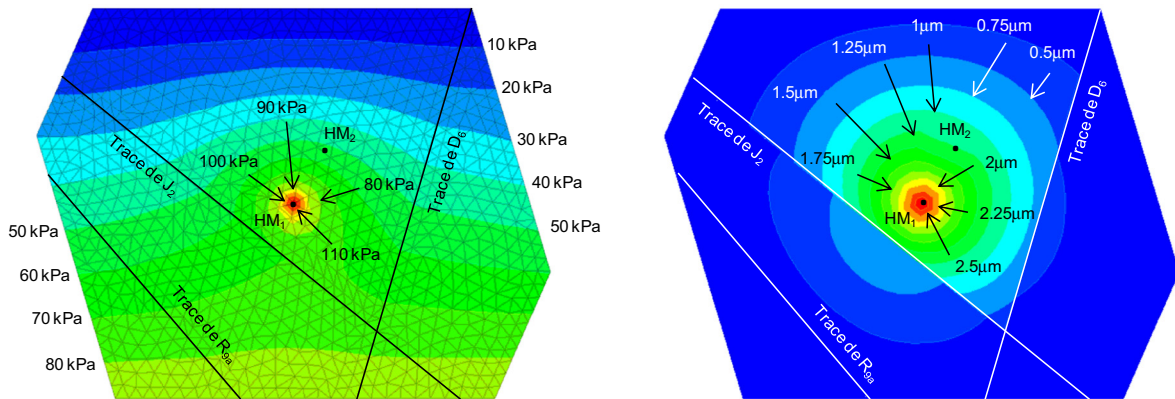
Comme on vient de le voir, les premiers modèles réalisés (à l'aide du code de calcul 3DEC) se limitaient à représenter le comportement hydromécanique des fractures principales



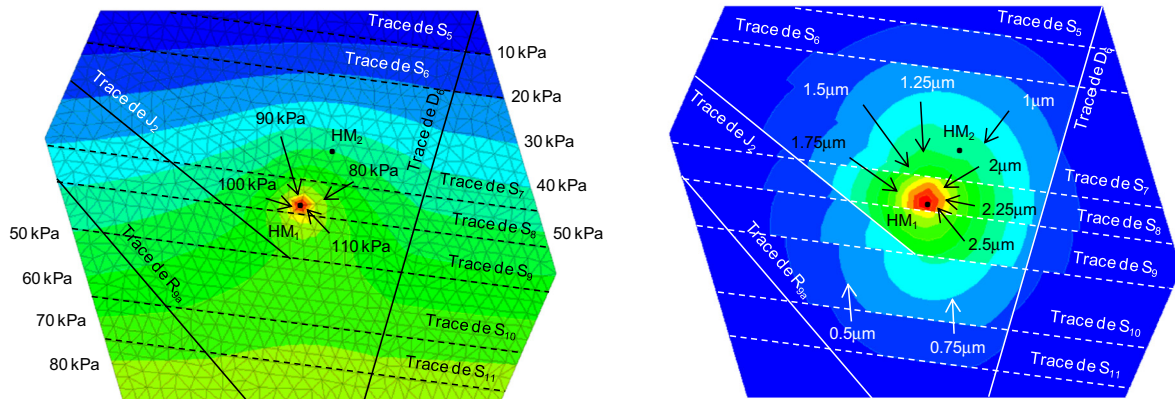
(a) géométrie A (fracture  $F_2$  seule) / geometry A (fracture  $F_2$  only)



(b) géométrie B (fractures  $F_2, R_{9a}, J_2, D_6$ ) / geometry B (fractures  $F_2, R_{9a}, J_2, D_6$ )

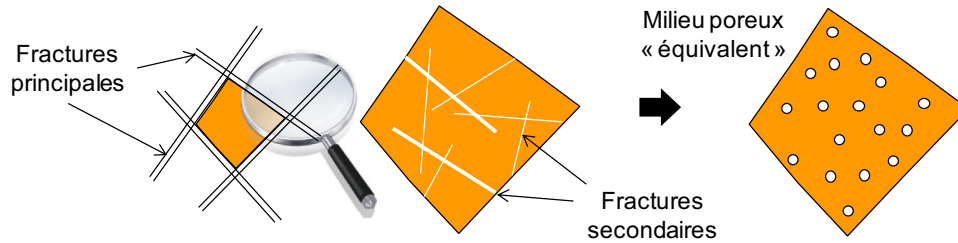


(c) géométrie C (toutes les fractures - cas de référence) / geometry C (all the fractures - reference case)

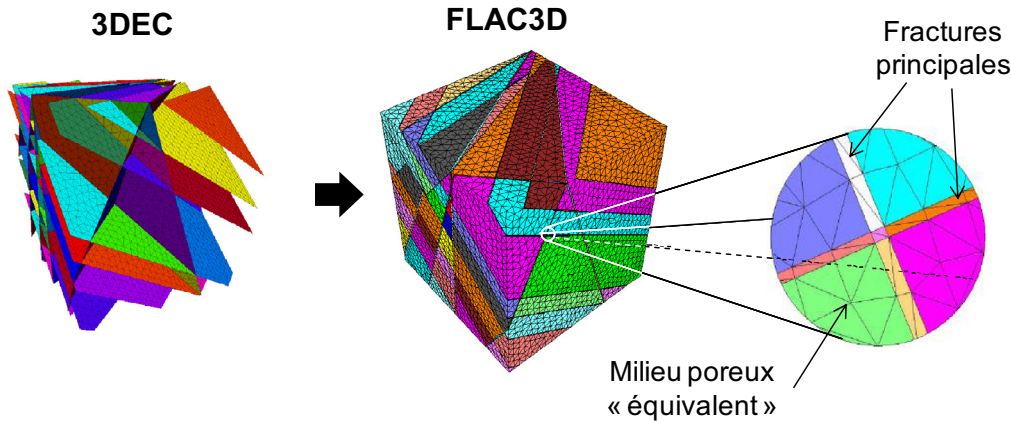


**Fig. 5.** Iso-valeur de pressions hydrauliques (à gauche) et de déplacements normaux (à droite) dans le plan de la fracture  $F_2$  pour les différentes géométries 3DEC : (a) géométrie A (fracture  $F_2$  seule) ; (b) géométrie B (fractures  $F_2, R_{9a}, J_2, D_6$ ) ; (c) géométrie C (toutes les fractures – cas de référence).

**Fig. 5.** Contours of hydraulic pressure (left) and normal displacement (right) calculated within the fracture  $F_2$  for the different 3DEC model geometries: (a) geometry A (fracture  $F_2$  only); (b) geometry B (fractures  $F_2, R_{9a}, J_2, D_6$ ); (c) geometry C (all the fractures – reference case).



**Fig. 6.** Illustration de la méthodologie mise en œuvre pour homogénéiser les propriétés des blocs découpés par les fractures “clés”.  
**Fig. 6.** Illustration of the upscaling methodology applied to the blocks cut by the “key” fractures.



**Fig. 7.** Construction de la géométrie du modèle FLAC3D à partir du modèle 3DEC : (a) sans homogénéisation ; (b) avec homogénéisation.  
**Fig. 7.** Construction of the FLAC3D model geometry from the 3DEC model: (a) without upscaling; (b) with upscaling.

du site de Coaraze en négligeant les écoulements à travers les fractures secondaires et la matrice calcaire poreuse, les « blocs » découpés par les fractures principales retenues étant supposés imperméables. Ces modèles assimilaient également le comportement mécanique de ces « blocs » à celui de la matrice rocheuse intacte.

La nouvelle approche vise à associer à chaque « bloc » découpé par les fractures principales retenues, des caractéristiques hydromécaniques équivalentes susceptibles de restituer plus fidèlement le comportement hydromécanique du milieu réel (poreux et fracturé, la fracturation étant liée aux fractures non introduites explicitement) qu’il est supposé représenter (Fig. 6).

La détermination des caractéristiques hydromécaniques équivalentes n’est qu’un préalable aux nouvelles modélisations des expérimentations locales. Celles-ci ont nécessité le choix d’un nouveau code de calcul permettant simultanément la modélisation explicite du comportement hydromécanique des fractures principales (comme le faisait déjà le logiciel 3DEC) et celui des milieux poreux « équivalent », déterminé préalablement.

### 3.2.1 Description du modèle FLAC3D

Nous avons choisi d’utiliser le logiciel FLAC3D dans sa version 3.10 (Itasca Consulting Group Inc., 2002). Avec ce logiciel, les fractures sont représentées comme des zones tabulaires de roche poreuse de faibles épaisseurs dont les

caractéristiques hydromécaniques (déformabilités, perméabilité) sont déterminées analytiquement à partir des caractéristiques des fractures réelles (raideurs, ouverture hydraulique).

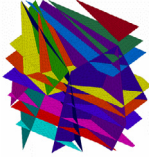
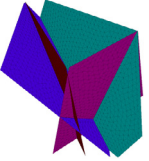

Cette démarche permet de transformer les modèles 3DEC précédents en des modèles FLAC3D (Fig. 7) donnant la même réponse hydromécanique à l’injection (dans la mesure où on considère que les zones « interf fractures » sont, dans les deux cas, constituées de la matrice calcaire supposée imperméable).

#### 3.2.1.1 Détermination des propriétés équivalentes des zones tabulaires représentant les fractures

La procédure a consisté à associer un modèle transversalement isotrope aux zones tabulaires, le plan d’isotropie (1–2) correspondant au plan de la fracture. Les paramètres à spécifier, en plus de l’orientation du plan d’isotropie sont  $E_1$ ,  $E_3$ ,  $G_{13}$ ,  $\nu_{12}$  et  $\nu_{13}$ . Les relations entre ces paramètres et les raideurs normales et de cisaillement ( $k_n$  et  $k_s$ ) sont les suivantes :  $E_1 = 1. K_s$  ;  $E_3 = e.K_n$  ;  $G_{13} = E_1.E_3/(E_1 + E_3)$  ;  $\nu_{12} = \nu_{13} = 0$  (où  $e$  est l’épaisseur de la zone tabulaire).

Par ailleurs, la valeur de la perméabilité intrinsèque de la zone tabulaire) équivalente à celle d’une fracture d’ouverture hydraulique  $a_0$  est :  $a_0 = k_{\text{tabulaire}}^3/12e$ . On a également estimé la porosité équivalente ( $n_{\text{tabulaire}} = a/e$ ), ainsi que le module de Biot équivalent ( $M_{\text{tabulaire}} = K_w/n_{\text{tabulaire}} = e K_w/a$ , où  $K_w$  est la compressibilité de l’eau).

**Tableau 3.** Caractéristiques hydromécaniques équivalentes des « blocs » découpées par les fractures principales (trois options sont considérées).  
**Table 3.** Equivalent hydromechanical characteristics of the blocks cut by the “key” fractures (three options are considered).

Géométrie	Fractures principales (retenues)	Fractures secondaires (écartées)	Tenseurs équivalents (dans le repère de FLAC <sub>3D</sub> )						K <sub>ij</sub> (10 <sup>-6</sup> m/s)		
			T <sub>ijkl</sub> (10 <sup>9</sup> MPa)								
 <p>C</p>	Toutes les fractures	Aucune	53,8	23,1	23,1	0,0	0,0	0,0	Perméabilité de la matrice calcaire : 10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> (supposée isotrope)		
			53,8	23,1	0,0	0,0	0,0				
			53,8	0,0	0,0	30,8	0,0	0,0			
 <p>B</p>	F <sub>2</sub> R <sub>9a</sub> , J <sub>2</sub> , D <sub>6</sub>	Les joints de stratification	28,7	17,3	18,5	-4,2	5,2	-4,5	0,103 -0,13 0,131 0,481 0,119 0,343		
			39,5	17,1	-10,3	-0,3	7,3				
			36,3	1,7	10,8	6,2	21,9	-3,8			
 <p>A</p>	F <sub>2</sub>	Toutes les fractures sauf F <sub>2</sub>	17,6	9,1	9,4	-1,4	0,5	-1,9	21,96 -0,49 0,248 19,23 3,83 8,368		
			19,9	10,5	-1,5	0,8	5,4				
			14,2	0,2	1,1	1,4	9,4	-0,5			
							7,5	0,3			
							11,5				

Le tenseur de perméabilité K<sub>ij</sub> relie le vecteur débit et le gradient hydraulique, le tenseur de rigidité T<sub>ijkl</sub> relie le tenseur des contraintes au tenseur des déformations.

**3.2.1.2 Détermination des caractéristiques hydromécaniques équivalentes des blocs fracturés et poreux définis par les fractures principales**

Une des techniques d’homogénéisation la plus connue est celle développée par Oda (1986) et améliorée depuis par Ababou (1991). Elle permet de prendre en compte non seulement l’ouverture et l’orientation de chacune des fractures, mais aussi leur extension, ainsi que leurs caractéristiques mécaniques. On détermine alors, pour un volume élémentaire représentatif (VER), le tenseur de conductivité hydraulique équivalent et les tenseurs définissant la relation entre les contraintes et les déformations.

Pour tenir compte des interactions des fractures, d’autres techniques basées sur la simulation numérique par la méthode des éléments finis (Coste *et al.*, 1999) ou par la méthode des éléments distincts. Nous avons mis en œuvre ici celle développée par Thoraval et Renaud (2004). Il s’agit tout d’abord d’identifier la géométrie de chacun des « blocs » à homogénéiser (matrice découpée par des fractures secondaires). On calcule ensuite, par simulations numériques, la réponse de ces « blocs » à différents chargements hydromécaniques, de sorte à déterminer les tenseurs de perméabilité K<sub>ij</sub> (tenseur d’ordre 2 reliant le vecteur débit et le gradient hydraulique)

et de rigidité T<sub>ijkl</sub> (tenseur d’ordre 4 reliant le tenseur des contraintes au tenseur des déformations) d’un milieu poreux continu « équivalent » au milieu fracturé considéré.

Le Tableau 3 montre les résultats de l’homogénéisation pour les trois géométries décrites précédemment. Logiquement, les propriétés équivalentes varient selon le nombre de fractures explicitement incluses dans les modèles.

**3.2.2 Impact de la perméabilité de la roche intacte et de l’homogénéisation sur la qualité des prédictions**

On a testé tout d’abord la sensibilité des résultats à la valeur de la perméabilité intrinsèque de la roche intacte. Les résultats montrent que les écarts, par rapport à un modèle supposant une matrice imperméable, restent inférieurs à 1 % aussi longtemps que la perméabilité matricielle reste inférieure à 10<sup>-15</sup> m<sup>2</sup>. Si la perméabilité de la masse rocheuse augmente jusqu’à 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>, les écarts atteignent 15 %.

Le Tableau 4 rassemble les valeurs de pressions hydrauliques et de déplacements normaux calculé en HM<sub>1</sub> et HM<sub>2</sub> dans la fracture instrumentée pour les trois géométries A, B et C considérées. Deux cas de figure sont envisagés selon que les blocs découpés par les fractures principales sont considérés

**Tableau 4.** Résultats des simulations des essais d'injection par palier avec FLAC<sub>3D</sub> pour les différentes options de simplification et d'homogénéisation – Débits, variation de pressions hydrauliques et de déplacements normaux calculées à l'intersection (HM<sub>1</sub> et HM<sub>2</sub>) de la fracture F<sub>2</sub> avec les forages (en gras : sollicitation imposée).

**Table 4.** FLAC<sub>3D</sub> simulation results of the injection tests for different options of simplification and upscaling – Flow rates, hydraulic pressure and normal displacement variations calculated at the intersections (HM<sub>1</sub> and HM<sub>2</sub>) of fracture F<sub>2</sub> with the boreholes (in bold: imposed stress).

Géométrie A : F <sub>2</sub> Géométrie B : F <sub>2</sub> , R <sub>9a</sub> , J <sub>2</sub> et D <sub>6</sub> Géométrie C : toutes les fractures	Débit (l/s)	Valeurs calculées en HM <sub>1</sub>		Valeurs calculées en HM <sub>2</sub>	
		Variation de la pression hydraulique (kPa)	Variation du déplacement normal (μm)	Variation de la pression hydraulique (kPa)	Variation du déplacement normal (μm)
Le milieu découpé par les fractures principales est considéré imperméable (l'impact des fractures secondaires et de la perméabilité matricielle est négligé)					
1 <sup>er</sup> palier	A	0,657			
	B	0,817	<b>+34</b>		
	C	0,747			
2 <sup>e</sup> palier	A	1,421			
	B	1,764	<b>+76</b>		
	C	1,616			
Le milieu découpé par les fractures principales (constitué de la matrice poreuse et des fractures secondaires) est homogénéisé – voir <a href="#">Tableau 3</a> (la perméabilité de la roche intacte vaut $k = 10^{-16} \text{ m}^2$ )					
1 <sup>er</sup> palier	A	0,848			
	B	0,814	<b>+34</b>		
	C	0,750			
2 <sup>e</sup> palier	A	1,835			
	B	1,807	<b>+76</b>		
	C	1,617			

imperméables (comme précédemment avec 3DEC) ou pas. Dans le deuxième cas, les propriétés hydromécaniques « équivalentes » du milieu constitué de la matrice poreuse et des fractures secondaires sont celles données dans le [Tableau 3](#).

On note en particulier que :

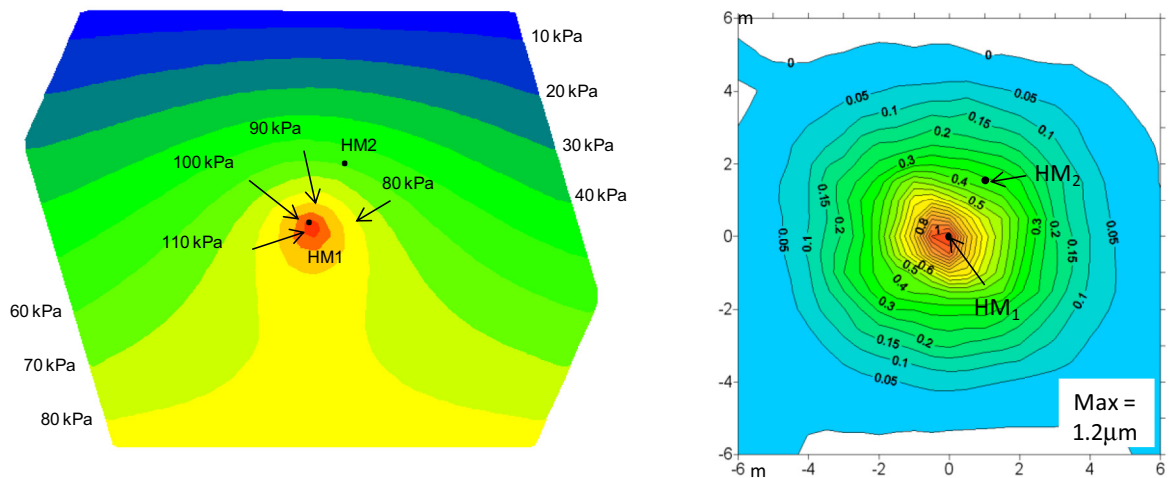
- la prise en compte des fractures secondaires par homogénéisation tend à réduire (globalement) les écarts entre la réponse hydromécanique calculée pour les différentes géométries, l'homogénéisation compensant l'absence de ces fractures secondaires. En effet, les écarts calculés entre la géométrie A (une seule fracture principale) et B (quatre fractures principales) passent en moyenne de 19 à 4 % pour le débit en HM<sub>1</sub>, de 12 à 5 % pour le déplacement normal en HM<sub>1</sub>, de 20 à 10 % pour la pression hydraulique en HM<sub>2</sub>. Les écarts entre géométrie A et B restent toutefois importants avec homogénéisation pour ce qui concerne le déplacement normal en HM<sub>2</sub>. Dans ce cas, il semble difficile d'estimer correctement le déplacement normal en HM<sub>2</sub> à partir de la géométrie A, même avec homogénéisation des fractures secondaires ;
- la prise en compte, par l'homogénéisation, des fractures secondaires ne semble nécessaire que dans le cas où seule la fracture instrumentée est retenue explicitement (géométrie A). Dans ce cas, la perméabilité équivalente calculée ([Tab. 3](#)) est suffisamment importante (environ  $2,10^{-5} \text{ m/s}$ ) pour induire une diminution des pressions plus rapide autour du point HM<sub>1</sub> ainsi qu'une augmentation du débit d'injection en ce point. On note sur la [Figure 8](#) une baisse importante des pressions hydrauliques et des déplacements normaux autour le point HM<sub>1</sub> ;

- dès lors qu'un nombre minimal de fractures est retenu explicitement (géométrie B), il n'apparaît plus aussi indispensable de procéder à une homogénéisation. En effet la réponse hydromécanique de la fracture instrumentée en HM<sub>1</sub> et HM<sub>2</sub> est à peu près la même que l'on homogénéise ou non. La comparaison des [Figures 8b](#) et [9b](#) confirme que les valeurs de pressions hydrauliques et de déplacements normaux dans la fracture F<sub>2</sub> ne sont pas affectés par le nombre de fractures prises en compte explicitement dès lors que les fractures « exclues » le sont par homogénéisation. Cela s'explique par le fait que, pour ces modalités, la perméabilité équivalente demeure faible (environ  $5,10^{-7} \text{ m/s}$ ) devant celle des fractures (environ  $10^{-3} \text{ m/s}$  pour les diaclases et  $10^{-5} \text{ m/s}$  pour les joints de stratification). Une diminution de sa valeur n'engendre donc pas d'impact sur la réponse hydromécanique de la fracture instrumentée F<sub>2</sub>. Les mêmes résultats sont obtenus pour la réponse mécanique de la fracture ; inclure quelques fractures supplémentaires (géométrie B ou lieu de A) réduit le déplacement normal maximum en HM<sub>1</sub> de 17 % sans homogénéisation et de 6 % avec.

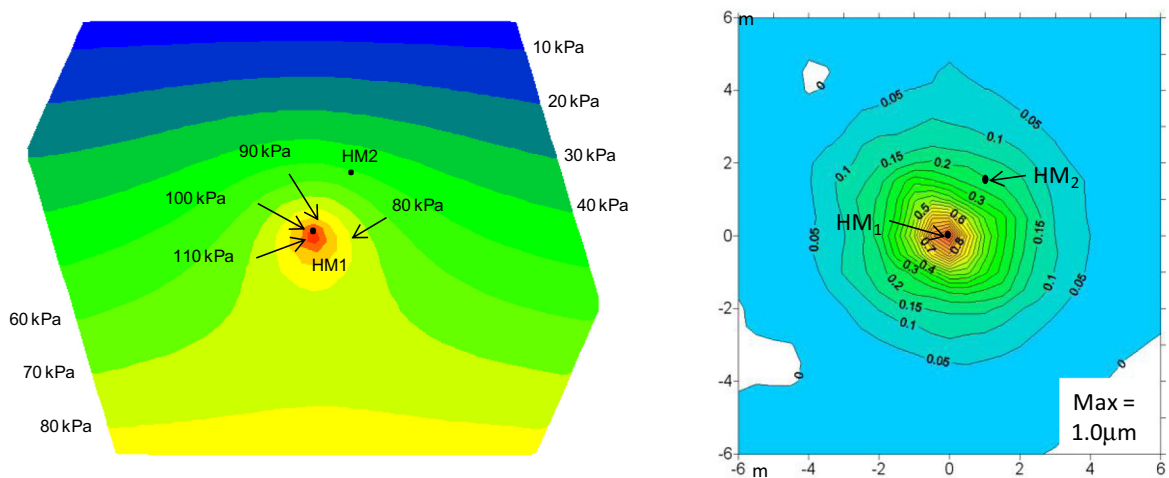
## 4 Discussion

Les données d'entrée du modèle comprennent des données géologiques, géométriques, mécaniques et hydrauliques. Pour cet article, elles sont spécifiques aux caractéristiques du site de Coaraze. Il est légitime de se demander si les résultats obtenus ici sont extrapolable pour prédire le

(a) sans homogénéisation / without upscaling



(b) avec homogénéisation / with upscaling



**Fig. 8.** Iso-valeurs des pressions hydrauliques (à gauche) et des déplacements normaux (à droite) calculés au sein de la fracture  $F_2$  avec FLAC3D dans le cas de la géométrie A (où seule la fracture  $F_2$  est prise en compte de façon explicite) : (a) sans homogénéisation ; (b) avec homogénéisation.

**Fig. 8.** Contours of hydraulic pressure (left) and normal displacement (right) calculated within the fracture  $F_2$  with FLAC3D in the case of geometry A (where only the fracture  $F_2$  is taken into account explicitly): (a) without upscaling; (b) with upscaling.

comportement hydromécanique d'autres sites, si la géologie ou le contexte (pentes rocheuses instables, carrières, stockages souterrains) diffèrent.

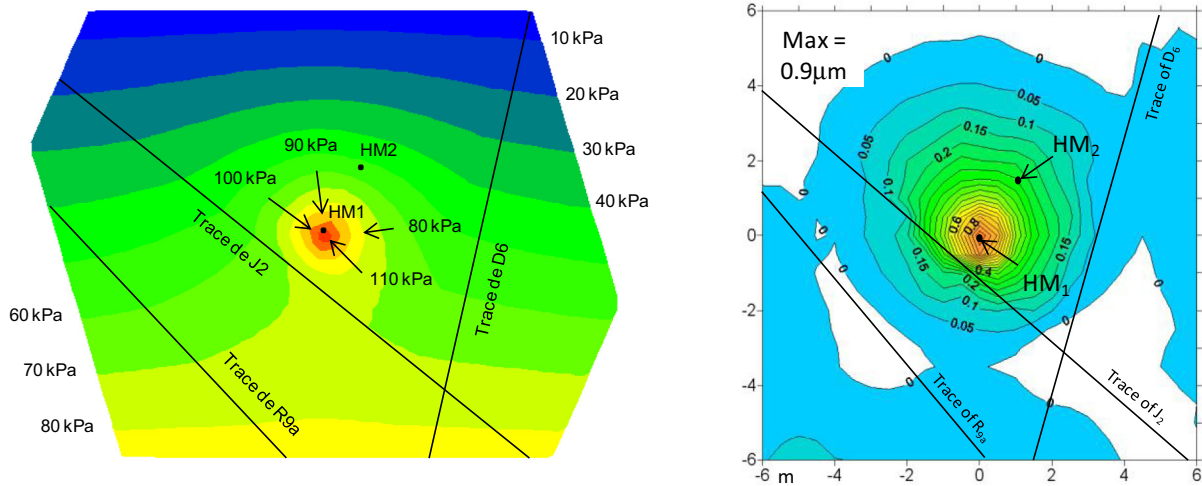
Dans le cas du site de Coaraze, les discontinuités majeures étaient les fractures subverticales plus perméables et déformables. Ce n'est pas le cas de tout massif rocheux et cela doit évidemment être considéré pour d'autres applications. Par exemple, dans le cas de fronts rocheux instables ou des carrières à ciel ouvert, les discontinuités majeures pourraient être les plans de glissements potentiels ; dans le cas des stockages, il pourrait s'agir des chemins d'écoulements préférentiels. Il est clair que dans chaque cas, c'est à l'expert d'identifier ces discontinuités majeures en fonction du contexte et des objectifs fixés au modèle prédictif.

À noter que la caractérisation géologique du site de Coaraze a bénéficié d'une nouvelle méthode de relevé de la fracturation

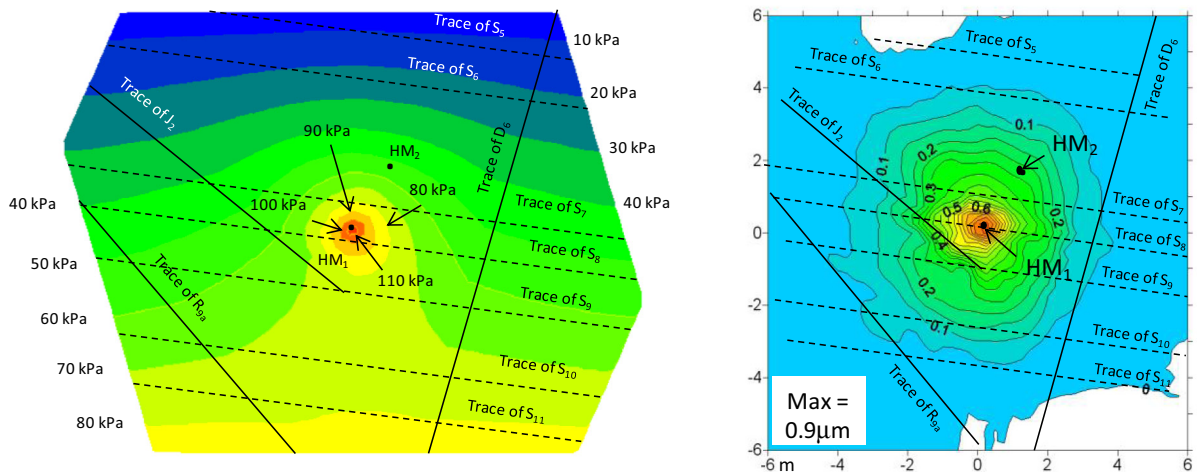
par mesures tachéométriques qui présente l'avantage de localiser précisément les fractures dans l'espace. Cette technique apparaît comme complémentaire à la méthode classique par ligne de mesures qui permet uniquement de déterminer les caractéristiques moyennes des différentes familles de fractures (orientation, espacement ou densité). Compte tenu de la sensibilité constatée des prédictions à la prise en compte correcte des fractures « clés », il semble donc judicieux de réserver la nouvelle méthode de mesure à la localisation précise de ces discontinuités.

Les modélisations réalisées sont basées sur des modèles conceptuels représentant le comportement hydraulique, mécanique et hydromécanique des fractures et de la matrice rocheuse poreuse qu'elles découpent. À chacun de ces modèles correspond un certain nombre de paramètres qui peuvent être évalués à l'aide d'essais de laboratoire ou d'expérimentation

(a) dans le cas de la géométrie B (fractures  $F_2$ ,  $R_{9a}$ ,  $J_2$  et  $D_6$ ) / in the case of the geometry B (fractures  $F_2$ ,  $R_{9a}$ ,  $J_2$  and  $D_6$ )



(b) dans le cas de la géométrie C (toutes les fractures) / in the case of the geometry C (all the fractures)



**Fig. 9.** Iso-valeurs des pressions hydrauliques (à gauche) et des déplacements normaux (à droite) calculés au sein de la fracture  $F_2$  avec FLAC3D en considérant une homogénéisation des fractures non prises en compte de façon explicite : (a) dans le cas de la géométrie B (fractures  $F_2$ ,  $R_{9a}$ ,  $J_2$  et  $D_6$ ) ; (b) dans le cas de la géométrie C (toutes les fractures).

**Fig. 9.** Contours of hydraulic pressure (left) and normal displacement (right) calculated within the fracture  $F_2$  with FLAC3D considering an upcaling of the fractures not taken into account explicitly: (a) in the case of geometry B (fractures  $F_2$ ,  $R_{9a}$ ,  $J_2$  and  $D_6$ ); (b) in the case of geometry C (all the fractures).

*in situ*. Il semble pertinent de se limiter à une caractérisation « classique » pour la matrice rocheuse et les principales familles de fractures. En fonction de la qualité de prédiction recherchée, une caractérisation plus précise et plus complète pourrait être nécessaire pour les discontinuités majeures. À cette fin, des essais *in situ* du type de ceux réalisés à Coaraze (mesures synchrones des variations de pression et de déformation induite par un essai d'injection/pompage à l'aide d'une sonde amovible) pourraient déterminer avec précision leur perméabilité et leur raideur, ainsi que les termes de couplage éventuels (qui pourraient être important dans le cas des stockages profonds par exemple).

Avant de construire un modèle, il est nécessaire d'identifier clairement l'objectif qu'on lui assigne et le contexte dans lequel on sera amené à l'utiliser. En effet, le degré de complexité que l'on y mettra (ou à l'inverse les simplifications que l'on s'autorisera) dépendent de la possibilité de négliger, de simplifier ou d'homogénéiser tel ou tel phénomène sans que l'on puisse remettre en cause, compte tenu de l'objectif et du contexte de l'étude, la pertinence des résultats obtenus.

Si l'on s'intéresse à la prédiction de la stabilité ou des écoulements à très grande échelle, il n'est pas envisageable 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 recourt à la technique d'homogénéisation permet de calculer les caractéristiques hydromécaniques d'un milieu continu poreux équivalent, ce qui rend possible une prédiction correcte du comportement hydromécanique global sans introduire explicitement toute la fracturation.

La technique utilisée dans ce programme, basée sur la modélisation de la réponse de la zone à homogénéiser à différents chargements hydromécaniques, peut être remplacée, si on le souhaite, par l'application des formulations analytiques d'Oda (1986), notamment dans le cas où la fracturation que l'on souhaite homogénéiser est connue en moyenne (ou statistiquement).

Le choix de l'outil numérique sera basé sur sa capacité à prendre en compte la géométrie (simplifiée ou homogénéisée), ainsi que les phénomènes physiques retenus après analyse du contexte et des objectifs. Un facteur limitant important est la nécessité, ou non, d'un modèle en trois dimensions. Les codes utilisés dans le cadre de cette recherche couvrent les différents cas de figure. Dans le cas où le milieu rocheux fracturé peut être entièrement homogénéisé, tout code permettant de simuler le comportement hydromécanique des milieux poreux peut convenir. Dans le cas où le milieu rocheux fracturé peut être remplacé par un réseau de fractures découpant une matrice imperméable, tout code permettant de simuler le comportement hydromécanique des fractures peut convenir. En revanche, dans le cas, le plus complexe, où le milieu rocheux fracturé est remplacé par un milieu à double porosité constitué de fractures majeures prises en compte explicitement et d'un milieu poreux équivalent représentant la matrice et l'ensemble des autres fractures, les choix se réduisent. Dans le cadre de cette recherche nous avons adapté le code FLAC3D à ce besoin.

## 5 Conclusion

À grande échelle, le milieu rocheux fracture est souvent représenté par un milieu continu équivalent car les fractures sont trop nombreuses pour être représentées explicitement dans un modèle informatique. Des techniques appropriées d'homogénéisation doivent être utilisées pour calculer les propriétés hydromécaniques d'un milieu poreux équivalent de sorte d'être en mesure de simuler correctement la réponse hydromécanique du milieu à une sollicitation.

Dans la présente étude, nous avons examiné les simplifications possibles permettant de prédire avec précision son comportement hydromécanique à différentes échelles.

Les principaux résultats de notre étude peuvent être résumés comme suit :

- une approche numérique 3D, couplant 3DEC et FLAC3D, a été développée. Elle permet de simuler le comportement hydromécanique d'un milieu constitué 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 ;
- la réponse hydromécanique *in situ* d'une fracture à une sollicitation directe (injection/pompage) ne dépend pas que des caractéristiques propres de cette fracture, mais

également des caractéristiques de la matrice et des fractures environnantes. La prédiction du comportement de la fracture sollicitée nécessite la prise en compte de l'environnement de la fracture soit explicitement, soit par homogénéisation ;

- la prise en compte explicite de quelques fractures supplémentaires connectées à la fracture sollicitée permet de simuler convenablement les expérimentations locales de quelques heures réalisées dans le site de Coaraze. Il apparaît dans ce cas que la prise en compte des fractures écartées par homogénéisation ne modifie pas significativement les résultats dès lors que le nombre de fractures introduites est suffisant. Cette conclusion pourrait toutefois être mise en défaut dans le cas d'expérimentations de longues durées (plusieurs jours).

## Références

- Ababou R. 1991. Approach to large scale unsaturated flow in heterogeneous stratified and fractured geologic media. In: *Report NUREG/CG-5743, US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC (USA)*.
- Blum P, Mackay R, Riley MS. 2009. Stochastic simulations of regional scale advective transport in fractured rock masses using block upscaled hydro-mechanical rock property data. *J. Hydrol.* 369: 318–325.
- Cappa F. 2006. Role of fluids in the hydromechanical behavior of heterogeneous fractured rocks: *in situ* characterization and numerical modeling. *Bull. Eng. Geol.* 65: 321–337.
- 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. Sci.* 42: 287–306.
- Cappa F, Guglielmi Y, Gaffet S, Lancon H, Lamarque I. 2006. Use of *in situ* fiber optic sensors to characterize highly heterogeneous elastic displacement fields in fractured rocks. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 43: 647–654.
- Coste F, Ghoreychi M, Didry O. 1999. Modélisation du comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés par homogénéisation. In: *Comptes rendus du Congrès international de mécanique des roches*, Éditeur G. Vouille & P. Berest.
- 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 recherches. Franche-Comté : Université de Franche-Comté.
- Guglielmi Y, Cappa F, Rutqvist J, Tsang CF, Thoraval A. 2008. Mesoscale characterization of coupled hydro-mechanical behavior of a fractured-porous slope in response to free water-surface movement. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 45: 862–878.
- 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.
- Itasca Consulting Group Inc. 2002. FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), version 2.1. Minneapolis, Minnesota: ICG.
- Lopez P, Thoraval A, Buzzi O, Rahmani I, Boulon M. 2007. Advances in constitutive modelling of jointed rock hydro mechanical interactions at laboratory scale. In: *18<sup>e</sup> Congrès français de mécanique, Grenoble, 27–31 août 2007*.
- Min KB, Jing L, Stephansson O. 2004. Determining the equivalent permeability tensor for fractured rock masses using a stochastic

- REV approach: method and application to the field data from Sellafield, UK. *Hydrogeol. J.* 12: 497–510.
- Oda M. 1986. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in joint rock masses. *Water Resour. Res.* 22: 1845–1856.
- Pouya A, Fouché O. 2009. Permeability of 3D discontinuity networks: new tensors from boundary-conditioned homogenization. *Adv. Water Resour.* 32: 303–314.
- Terzaghi K. 1923. Die Berechnung der Durchlässigkeitziffer des Tonensaus dem Verlauf Spannungserscheinungen. *Akad. Wiss. Wien Sitz., Math. Kl. IIA* 142: 125–138.
- Thoraval A. 2005. Analyse du comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés à partir d'essais *in situ* et de modélisation. In: *Rapport final BCRD-DRS-02/01 (référence INERIS DRS-05-66388/RN01), 30 novembre.*
- Thoraval A, Renaud V. 2004. Hydro-mechanical upcaling of a fractured rockmass using a 3D numerical approach. Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical processes in geo-systems – Fundamentals, modelling, experiments and applications. In: Stephansson O, Hudson JA, Jing L, eds. Elsevier geo-engineering book series (series editor: John Hudson), volume 2, pp. 275–280.
- Witherspoon PA, Wang JSY, Iwai K, Gale JE. 1980. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, *Water Resour. Res.* 16: 1016–1024.

**Citation de l'article** : Alain Thoraval, Frédéric Cappa, Yves Guglielmi. Modélisation du comportement hydromécanique d'un versant calcaire poreux et fracturé – Impact de simplifications géométriques et d'une homogénéisation des propriétés hydromécaniques sur la qualité des prédictions. Rev. Fr. Geotech. 2016, 147, 3.