

Document public

**Projet GEFAC : modélisation  
du comportement hydro-thermo-  
mécanique des milieux fracturés  
(module 1)**

Rapport d'avancement

**BRGM/RP-52702-FR**  
janvier 2004

A D E M E



# Projet GEFAC : modélisation du comportement hydro-thermo- mécanique des milieux fracturés (module 1)

Rapport d'avancement

**BRGM/RP-52702-FR**  
janvier 2004

Étude réalisée dans le cadre du projet  
de recherche géothermie HFR (ENED01)  
Convention BRGM-ADEME n° 02.05.034

**S. Gentier**  
Avec la collaboration de  
**A. Hosni, C. Dezayes, A. Genter**

Mots clés : Fracturation, Modélisation, Hydromécanique, Thermomécanique, Soultz, Géothermie, HFR.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Gentier S., Hosni A., Dezayes C., Genter A. (2003). *Projet GEFrac : modélisation du comportement hydro-thermo-mécanique des milieux fracturés (module 1). Rapport d'avancement. BRGM/RP-52702-FR, 178 p., 30 fig., 8 tabl., 11 ann.*

© BRGM, 2003, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Les travaux menés sur le site de Soultz-sous-Forêts depuis plusieurs années ont montré que la stimulation hydraulique des forages conduisait à une nette amélioration irréversible de la perméabilité initiale du milieu fracturé dans leur voisinage. La compréhension des mécanismes mis en jeu lors de ces stimulations hydrauliques et leurs effets durables sur le milieu est donc un enjeu majeur pour la poursuite de la géothermie Hot Fractured Rock (HFR).

L'objectif de cette étude réalisée dans le cadre du module 1 de la convention n° 02.05.038 avec l'ADEME est de poursuivre les travaux entrepris au cours des conventions précédentes (n° 99.05.024 et n° 00.05.187). Elle vise à développer une chaîne de calculs pour modéliser le comportement thermo-hydro-mécanique de massif rocheux fracturé profond sous l'effet des stimulations hydrauliques. Cette chaîne de calcul s'appuie sur un emboîtement de modèles à différentes échelles.

Le proche puits (1<sup>re</sup> couronne) est traité au moyen d'un code d'écoulement et d'assemblage de particules (PFC) permettant de prendre en compte d'une part, la géométrie et la nature des zones d'accès à l'échangeur et, d'autre part, le couplage thermo-hydro-mécanique fort régnant dans les premiers mètres autour du forage d'injection. Au cours de cette convention, la poursuite des modélisations du comportement thermo-hydro-mécanique au moyen du code PFC<sup>2D</sup> a permis de mieux cerner l'influence des conditions aux limites mécaniques et thermiques et a confirmé le rôle joué par la présence de certains faciès, comme les veines de quartz, sur l'apparition de microfissures dans le proche environnement des zones d'accès à l'échangeur au cours des stimulations hydrauliques.

La zone fortement stimulée (2<sup>e</sup> couronne) définie à partir de la localisation des événements microsismiques enregistrés lors des stimulations est traitée au moyen d'un code couplé hydromécanique 3D (3DEC/FLO) reposant sur les interactions d'un assemblage de blocs polyédriques définis par un champ de fracturation. Les travaux de modélisation réalisés à ce jour montrent que moyennant une phase de calage permettant de définir la loi de comportement mécanique la mieux adaptée et le jeu de paramètres associés, il est possible d'espérer modéliser l'effet des stimulations hydrauliques dans les milieux fracturés. En effet, une corrélation significative a été mise en évidence entre l'orientation des fractures stimulées et celle des contraintes principales. La stimulation hydraulique serait plus favorable pour les fractures qui ont une orientation proche de celle de la contrainte principale maximale horizontale. De plus, il semble que l'augmentation brusque de la perméabilité du massif puisse coïncider avec la mise en place des ruptures par cisaillement dans les plans de fractures. Il semblerait alors fort probable que le mécanisme de rupture par cisaillement soit à l'origine du phénomène observé par les mesures. Par ailleurs, ce mécanisme se met en place de façon irréversible, ce qui pourrait également expliquer le comportement irréversible constaté à l'issue des essais. La modélisation des tests d'injection post-stimulations entreprise confirme l'irréversibilité de l'augmentation de la perméabilité en conséquence aux mécanismes de rupture en cisaillement préalablement pris en compte dans la modélisation des stimulations hydrauliques.



# Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	11
1.1. problématique .....	11
1.2. Objectif général et démarche proposée pour la géothermie des hot fractured rock .....	14
1.3. Rappel des travaux antérieurs.....	15
1.3.1. Données de base .....	15
1.3.2. Outils de modélisation .....	17
1.3.3. Calculs préliminaires .....	17
1.3.4. Conclusion.....	18
1.4. Objectif de l'étude .....	18
<b>2. Zones d'accès à l'échangeur (1<sup>re</sup> couronne)</b> .....	19
2.1. Analyse quantitative des faciès .....	19
2.2. Modélisation thermo-hydro-mécanique .....	19
2.2.1. Modélisation de la zone n° 2 .....	19
2.2.2. Modélisation de la zone n° 3 .....	23
2.2.3. Conclusion.....	23
<b>3. Zones fortement stimulées (2<sup>e</sup> couronne)</b> .....	25
3.1. Géométrie du réseau de fracture.....	25
3.1.1. Géométrie du réseau de failles interceptées dans GPK1.....	25
3.1.2. Géométrie du réseau de failles interceptées dans GPK2.....	26
3.2. Modélisation des stimulations.....	27
3.2.1. Modélisation de la stimulation de GPK1.....	30
3.2.2. Modélisation de la stimulation de GPK2.....	37
3.2.3. Conclusion.....	40
3.3. Modélisation des injections post stimulations .....	41
3.3.1. Objectif .....	41
3.3.2. Démarche de modélisation.....	42
3.3.3. Résultats de la modélisation.....	43

3.4. Conclusion .....	45
<b>4. Conclusion .....</b>	<b>47</b>
<b>5. Bibliographie.....</b>	<b>49</b>

## Liste des figures

Fig. 1 - Localisation des événements microsismiques associés aux stimulations hydrauliques de GPK1 (bleu) et dans GPK2 (rouge) : vue en plan (a) et vue en coupe (b). .....	12
Fig. 2 - Vue en plan de l'organisation des zones de stimulation autour d'un puits... 13	13
Fig. 3 - Répartition des couplages dominants en fonction de la distance au puits : coupe verticale. ....	14
Fig. 4 - Zones d'accès à l'échangeur retenues pour l'étude. ....	16
Fig. 5 - Faciès identifiés pour l'analyse des zones d'accès à l'échangeur. ....	16
Fig. 6 - Géométrie du modèle correspondant à la fracture perméable de la zone 2 de GPK1. ....	20
Fig. 7 - (a) Répartition des ruptures dans le modèle de référence après 1 heure (rouge : rupture en compression ; noir : rupture en traction) ; (b): Initiation d'une nouvelle fissure à partir de l'éponte après 1 heure.....	20
Fig. 8 - Évolution des températures pour quatre particules situées à des distances de 0 %, 33 %, 66 % et 100 % du centre de gravité du modèle dans les faciès veine de quartz (a) et granite hydrothermalisé (b).....	21
Fig. 9 - Répartition des ruptures dans le modèle après 1 heure.....	22
Fig. 10 - Répartition des ruptures dans le modèle après 1 heure dans l'hypothèse d'un fluide de température initiale de 70 °C (a) et dans l'hypothèse d'un fluide de température initiale de 20 °C (b) (rouge : rupture en compression ; noir : rupture en traction).....	22
Fig. 11 - Géométrie du modèle de la fracture perméable de la zone 3 de GPK1 (a) et répartition des micro-ruptures après 1 heure de sollicitation (b). ....	23
Fig. 12 - Orientation des différentes zones de failles dans GPK2 .....	27

Fig. 13 - Définition des conditions aux limites (a) et du modèle d'injection au puits (b) pour les deux types de modèles réalisés.....	28
Fig. 14 - Évolution de la rigidité en fonction de l'ouverture progressive de la fracture. ....	29
Fig. 15 - Modèle de comportement des fractures dans l'hypothèse d'un endommagement continu. ....	29
Fig. 16 - Paramètres intervenant dans la loi cubique. ....	30
Fig. 17 - Géométrie du réseau de fracture pris en compte dans les modélisations des stimulations de GPK1. ....	31
Fig. 18 - Influence de la raideur variable dans la loi de comportement sur les courbes pression-débit calculées et comparaison avec les données expérimentales. ....	32
Fig. 19 - Influence de la raideur variable sur l'extension de l'ouverture dans le plan d'une fracture stimulée.....	33
Fig. 20 - Courbes pression-débit calculées à partir des modèles 4 et 5 et comparaison avec les données expérimentales.....	34
Fig. 21 - Influence de l'orientation d'une des fractures sur la courbe pression-débit des stimulations hydrauliques. ....	35
Fig. 22 - Répartition des flux dans la partie ouverte de GPK.....	35
Fig. 23 - Récapitulatif de la répartition des flux dans l'open hole de GPK1 pour les principales étapes de la modélisation.....	36
Fig. 24 - Géométrie du réseau de fracture pris en compte dans les modélisations des stimulations de GPK2. ....	38
Fig. 25 - Courbes pression-débit calculées et mesurées au cours de la stimulation de GPK2. ....	39
Fig. 26 - Répartition des flux dans la partie ouverte de GPK2.....	39
Fig. 27 - Essais d'injections post-stimulation réalisés dans GPK1 (juillet 1994) et GPK2 (septembre 1996).....	41
Fig. 28 - Schéma des écoulements dans l'hypothèse d'une condition de type pression hydrostatique imposée sur les parois du puits.....	42
Fig. 29 - Schéma de l'évolution du champ des pressions dans un plan de fracture après l'arrêt des injections.....	43

Fig. 30 - Courbes pression-débit mesurées sur le site et calculée par le modèle lors de la simulation des essais d'injection de juillet 1994 dans le forage GPK1 (a) et de septembre 1996 dans le forage GPK2 (b)..... 45

## Liste des tableaux

Tabl. 1 - Géométrie des fractures retenues pour la modélisation de la stimulation dans GPK1. .... 26

Tabl. 2 - Géométrie des fractures retenues pour la stimulation dans GPK2. .... 26

Tabl. 3 - Paramètres élastiques des blocs supposés en granite dans les modèles. ... 28

Tabl. 4 - Propriétés hydromécaniques retenues pour la loi d'endommagement continu à raideur variable introduite dans les différents modèles..... 31

Tabl. 5 - Paramètres géométriques des fractures majeures rencontrées dans le forage GPK2..... 37

Tabl. 6 - Paramètres hydromécaniques des fractures..... 38

Tabl. 7 - Pressions et débits mesurés pendant l'essai d'injection mené en septembre 1996 dans le forage GPK2. .... 44

Tabl. 8 - Pressions et débits mesurés pendant l'essai d'injection mené en juillet 1994 dans le forage GPK1..... 44

## Liste des annexes

Ann. 1 - Analyse quantitative de la texture des faciès des granites cataclasés et bréchifiés ..... 51

Ann. 2 - Le logiciel PCF<sup>2D</sup> : rappels ..... 55

Ann. 3 - Comportement THM des zones d'accès à l'échangeur ..... 61

Ann. 4 - Caractérisation de la zone fracturée supérieure dans le forage GPK1 ..... 81

Ann. 5 - Révision des zones d'accès à l'échangeur dans le forage GPK2, de 3 200 à 3 600 m ..... 91

Ann. 6 - Le logiciel 3DEC/FLO : rappels ..... 111

Ann. 7 - Modélisation de la stimulation du forage GPK1.....	117
Ann. 8 - Modélisation de la stimulation du forage GPK2.....	137
Ann. 9 - Modélisation hydromécanique des tests d'injection post stimulation dans GPK2 .....	147
Ann. 10 - Modélisation hydromécanique des tests d'injection post stimulation dans GPK1 .....	159
Ann. 11 - Coupled THM modeling of the stimulated permeable fractures in the near well .....	169



# 1. Introduction

**D**ans le cadre de la **recherche en appui au développement des ressources géothermiques en milieux fracturés**, les travaux sur la modélisation du comportement thermo-hydro-mécanique du bâti rocheux fracturé du site géothermique de Soultz-sous-Forêts se sont poursuivis. Une troisième phase de travaux a été entreprise avec le soutien de l'ADEME (convention n° 02.05.038 - GEFRAC) et correspond au **module intitulé : Modèles conceptuels décrivant le comportement hydro-thermo-mécanique des milieux fracturés**. L'objectif de ce module est de définir et de fournir des conditions aux limites réalistes aux différentes modélisations des échangeurs géothermiques en milieux fracturés. Pour atteindre cet objectif, les travaux s'appuient sur la reprise et l'étude de la généralisation possible des développements réalisés antérieurement dans le cadre du projet Soultz. Ces travaux sont axés sur la modélisation des accès à l'échangeur avec la prise en compte des différents couplages Thermo-Hydro-Mécanique (THM) en s'appuyant sur une géométrie réaliste de la fracturation.

Ces travaux font suite à ceux développés dans le cadre des conventions ADEME n° 99.05.04 (Gentier *et al.*, 2002) et n° 00.05.187 (Gentier *et al.*, 2003). Après un rappel de la problématique globale, un résumé des travaux antérieurs permettra d'introduire les travaux de la présente étude.

## 1.1. PROBLÉMATIQUE

Le site géothermique de Soultz-sous-Forêts est actuellement équipé des deux forages GPK1 et GPK2 distants en surface de 480 m.

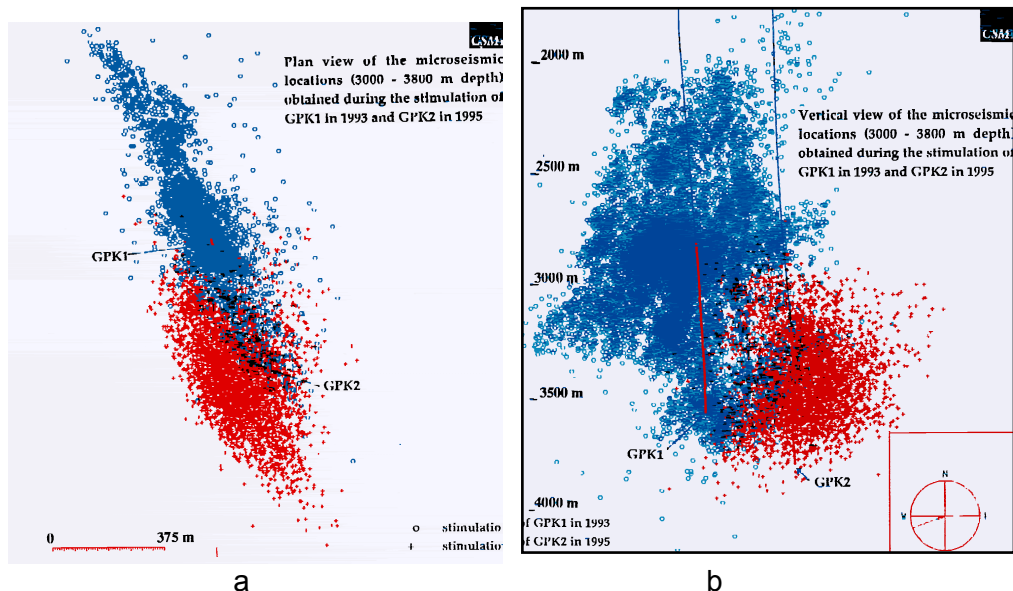
Les différentes campagnes de mesures hydrauliques (essais hydrauliques en monopuits, circulation longue durée, flowmètres,...) réalisées ces dernières années ont mis en évidence trois points capitaux, à savoir :

- la connexion entre les deux puits établie en 1995 et 1996 entre 3 000 m et 3 400 m de profondeur ;
- un accès à l'échangeur localisé au niveau de quelques zones de fractures à partir de chacun des puits (3 dans GPK1 et 2 dans GPK2) ;
- 25 % du fluide passe relativement directement d'un forage à l'autre au cours d'une circulation tracée de trois mois, en posant l'hypothèse que les phénomènes d'absorption sont négligeables (hypothèse validée par des essais ultérieurs).

Parallèlement, les différentes stimulations hydrauliques réalisées dans chacun des forages GPK1 et GPK2 se sont traduites, entre autres, par l'émission d'événements acoustiques (fig. 1). La plus grande partie de ces événements (70 à 80 %) est localisée dans un volume proche des puits qui peut être décrit dans un plan horizontal par une ellipse de 10 à 20 m pour le petit axe et de 80 à 100 m pour le grand axe.

Cette zone, que l'on qualifiera de zone fortement stimulée, est une zone où la perméabilité a été la plus augmentée par rapport à celle du milieu fracturé environnant. Les mécanismes à l'origine de cette augmentation peuvent être associés à des cisaillements et, dans une moindre mesure, à une fissuration de l'environnement dans ces zones fracturées. L'origine des événements microsismiques enregistrés au cours de ces stimulations est encore discutée. Les hypothèses les plus classiquement avancées résident dans des cisaillements locaux induits par une réduction de la contrainte normale, des ruptures à proprement parler ou des mécanismes purement hydrauliques.

Enfin, dans le très proche puits (environ quelques mètres), une diminution de l'impédance hydraulique du puits a été mise en évidence via des essais hydrauliques de mise en vibrations. Cette diminution de l'impédance peut être mise en relation avec une amélioration de l'entrée du fluide dans les zones fracturées en liaison avec un dégagement/nettoyage de ces fractures au voisinage des puits.



**Fig. 1 - Localisation des événements microsismiques associés aux stimulations hydrauliques de GPK1 (bleu) et dans GPK2 (rouge) : vue en plan (a) et vue en coupe (b).**

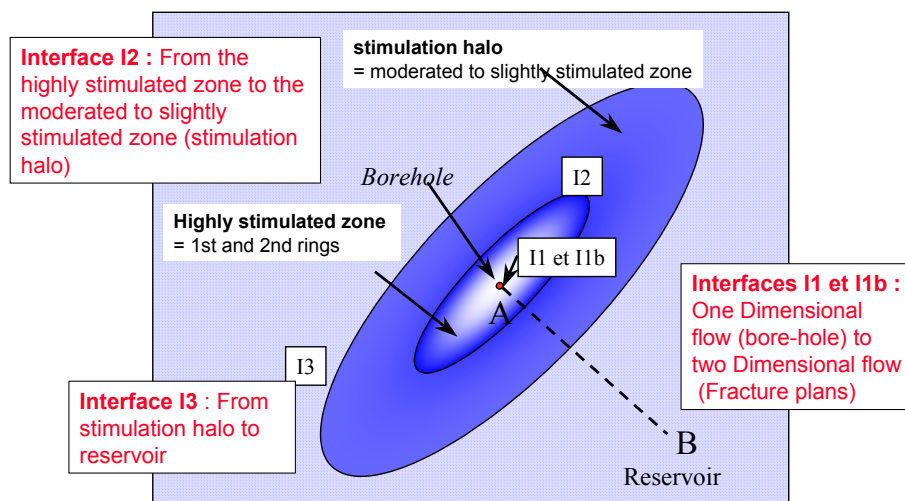
À partir de ces considérations, le volume autour des puits peut être décomposé en couronnes concentriques plus ou moins elliptiques. Cela nous conduit à définir entre le puits et le réservoir :

- une zone très fortement stimulée ;
- une zone moyennement stimulée ou halo de stimulation.

La figure 2 montre schématiquement en plan l'organisation de ces deux zones autour d'un puits. La définition de ces deux zones conduit à la définition de trois interfaces :

- une interface puits – zone très fortement stimulée (I1) ;
- une interface zone fortement stimulée – halo de stimulation (I2) ;
- halo de stimulation – réservoir (I3).

Cette distinction géométrique est en fait le reflet de l'importance relative des différents couplages rentrant en jeu. La zone fortement stimulée où le couplage est fort, le halo de stimulation où le couplage est faible et local.



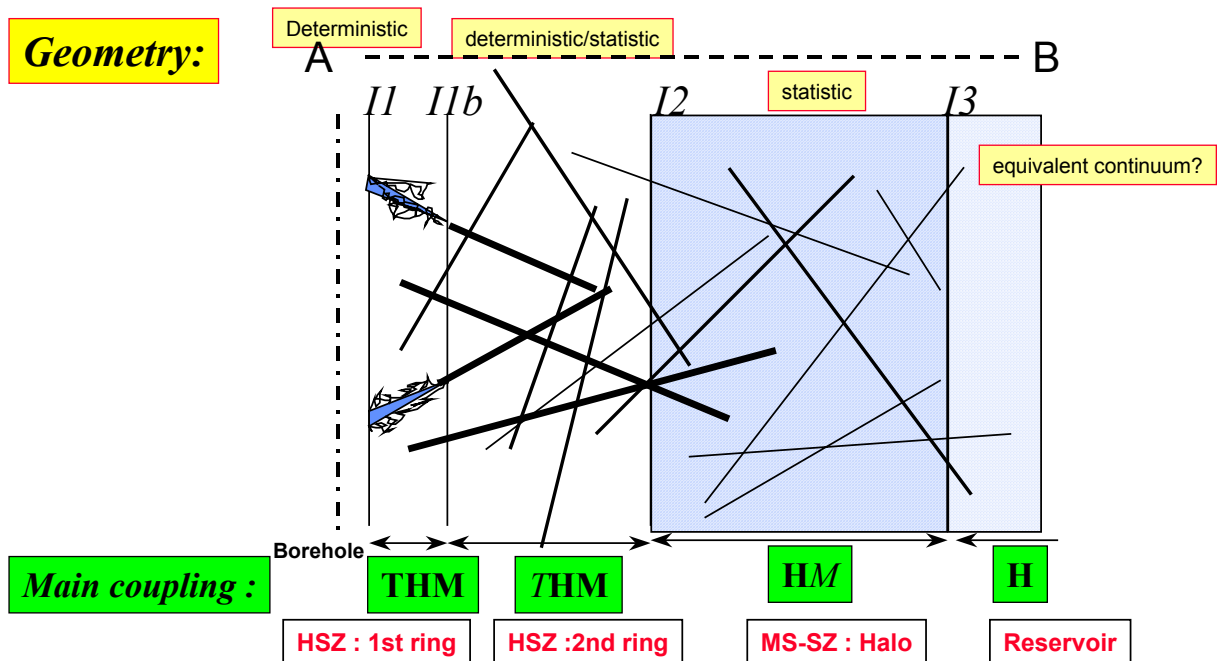
**Fig. 2 - Vue en plan de l'organisation des zones de stimulation autour d'un puits.**

Les stimulations, qui consistent à injecter un fluide froid sous pression mettent en jeu des mécanismes thermo-hydro-mécaniques. L'analyse plus fine de ces mécanismes laisse présager des couplages préférentiels selon la distance au puits considérée. À partir de cette idée, la zone très fortement stimulée peut alors être décomposée en :

- première couronne (I1a) où le couplage complet thermo-hydro-mécanique (THM) ne peut être *a priori* négligé ;
- deuxième couronne (I1b) où le couplage hydro-mécanique (HM) devient dominant. La deuxième couronne devient alors la partie de la zone fortement stimulée.

L'impact du couplage hydro-mécanique s'estompe avec le halo de stimulation pour ne plus jouer aucun rôle important au niveau du réservoir. Ceci est schématisé sur une coupe verticale (fig. 3).

En conclusion, le passage du fluide du puits à l'échangeur et au réservoir se fait de façon très ponctuelle en profondeur et de façon progressive latéralement par l'intermédiaire de zones où le couplage thermo-hydro-mécanique est prépondérant. Il est donc illusoire d'espérer pouvoir modéliser correctement l'ensemble échangeur-réservoir sans prendre en compte la spécificité de l'interface puits-échangeur. Cette spécificité réside notamment dans le passage d'un écoulement linéaire monodimensionnel dans le puits à un écoulement bidimensionnel dans des plans de fractures bien spécifiques limités à quelques éléments et dont les propriétés hydrauliques initiales sont fortement modifiées (1<sup>re</sup> couronne). Cet écoulement bidimensionnel se propage ensuite dans la zone fortement stimulée (2<sup>e</sup> couronne) où les plans d'écoulements sont plus nombreux et où la géométrie du réseau connecté devient un paramètre fondamental se superposant à une modification des propriétés hydrauliques des drains liée aux stimulations.



**Fig. 3 - Répartition des couplages dominants en fonction de la distance au puits : coupe verticale.**

La spécificité de l'interface puits échangeur ne réside donc pas seulement dans les couplages dominants, mais également dans l'échelle de fracturation où l'écoulement est possible (fig. 3).

Par conséquent, l'accès au halo de stimulation, à l'échangeur à proprement parler et au réservoir, est fortement conditionné par les conditions hydrauliques régnant à l'interface (I2) entre la zone fortement stimulée et le halo de stimulation.

## 1.2. OBJECTIF GÉNÉRAL ET DÉMARCHÉ PROPOSÉE POUR LA GÉOTHERMIE DES HOT FRACTURED ROCK

Partant de cette problématique, un objectif majeur pour faire de la géothermie HFR une géothermie rentable serait d'atteindre un niveau de compréhension et de modélisation des stimulations et de leurs effets tel que les opérations de stimulations soient parfaitement maîtrisées et adaptées au site stimulé.

Pour ce faire, une analyse des données disponibles et des développements numériques spécifiques doivent être entrepris.

L'approche préconisée est une approche sélective et progressive basée sur l'emboîtement de modèles, à différentes échelles, intégrant chacun les couplages dominant dans des géométries adéquates. Cette approche présente l'avantage de pouvoir s'adapter partiellement ou totalement à différents types de sites.

Le développement d'un code couplé thermo-hydro-mécanique en milieu fracturé permettant d'intégrer l'ensemble allant de la première couronne au réservoir est à ce jour illusoire. En conséquence, il est nécessaire et avantageux d'essayer de partir de codes existants en partant des considérations suivantes :

- la modélisation de la première couronne nécessite un couplage THM appliqué à une fracture discrète mais dont l'environnement pourra être pris en compte le plus finement possible ;
- la modélisation de la deuxième couronne nécessite un couplage HM appliqué à un réseau de fractures mi-déterministe (lien avec la première couronne), mi-statistique (lien avec le halo et le réservoir) ;
- la modélisation du halo nécessite un couplage HM partiel appliqué à un réseau de fractures qui ne peut à cette échelle qu'être statistique ;
- la modélisation du réservoir nécessite un modèle hydraulique robuste dans un réseau de fractures défini statistiquement.

### 1.3. RAPPEL DES TRAVAUX ANTÉRIEURS

Au cours des phases précédentes des travaux, l'accent a été mis d'une part, sur l'acquisition des données de base nécessaires aux différentes modélisations et sur le développement des outils de modélisation (Gentier *et al.*, 2002) et, d'autre part, sur la mise en œuvre dans le cadre de calculs préliminaires des différents outils de modélisation développés et/ou adaptés (Gentier *et al.*, 2003).

#### 1.3.1. Données de base

Les données de base acquises sont d'ordres géologique, physique, mécanique et thermique.

À l'échelle de la première couronne, les contextes pétrographiques et structuraux des zones d'accès à l'échangeur ont été étudiés en détail. Les zones d'accès retenues pour le présent développement sont récapitulées ci-dessous (fig. 4).

L'analyse de leur contexte a conduit à établir une banque de faciès (fig. 5) constituée de six éléments de base. Parmi les six faciès élémentaires, trois faciès (granite sain, granite hydrothermalisé et veine de quartz) ont été analysés quantitativement afin de produire les éléments essentiels à la modélisation thermo-hydro-mécanique des zones d'accès et d'infirmier ou confirmer l'influence du faciès sur le comportement local. Ces données ont été complétées par une compilation des données disponibles sur la structure interne des zones d'accès (ouvertures moyennes, carte des vides). Les informations géologiques ont été complétées par la constitution d'une base de données des propriétés physiques, mécaniques et thermiques en relation avec les différents faciès.

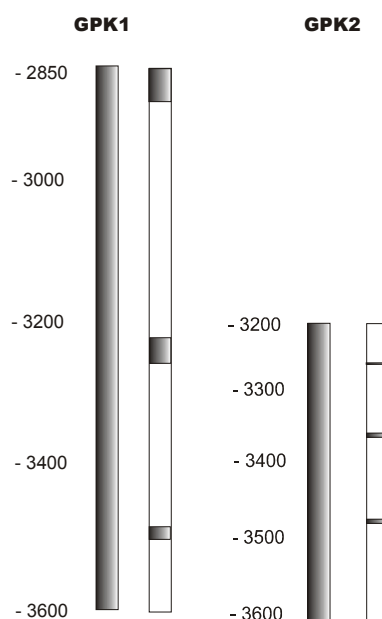


Fig. 4 - Zones d'accès à l'échangeur retenues pour l'étude.

<b>GRAN</b> Granite sain Texture : mégacristsaux de FK	<b>HYDR</b> Granite hydrothermalisé Texture : mégacristsaux de FK	<b>CATA</b> Granite cataclaté Texture : grossière à grenue
<b>BREC</b> Granite bréchifié Texture : bréchique à micro bréchique	<b>VEIN</b> Veine Quartz Texture : micro cristalline	<b>LEUCO</b> Leucogranite ou granite à 2 micas Texture : microgrenue

Fig. 5 - Faciès identifiés pour l'analyse des zones d'accès à l'échangeur.

À l'échelle de la deuxième couronne et du réservoir, l'étude d'analogues dans des contextes tectoniques similaires à celui de Soultz-sous-Forêts a permis d'améliorer la connaissance des réseaux de fractures qui n'est accessible sur le site qu'au travers des données de forage.

### 1.3.2. Outils de modélisation

Pour l'étude du comportement thermo-hydro-mécanique de la première couronne, le code PFC<sup>2D</sup> (Particle Flow Code) a été adapté pour pouvoir prendre en compte la pression exercée par le fluide injectée sur les épontes de la fracture.

Pour l'étude du comportement hydro-mécanique de la deuxième couronne, en liaison avec les stimulations hydrauliques des forages, un code couplé 3D a été développé (3DEC/FLO).

Au niveau du réservoir, des modifications d'ordre géométrique et l'introduction de nouvelles lois de comportement ont été réalisées dans le code hydraulique FRACAS développé par l'École des Mines de Paris afin de préparer l'interface entre la modélisation hydromécanique de la deuxième couronne et la modélisation hydraulique du système complet.

### 1.3.3. Calculs préliminaires

Pour l'étude du comportement thermo-hydro-mécanique de la première couronne, le code PFC<sup>2D</sup> a été mis en œuvre sur une zone d'accès correspondant à un contact veine de quartz - granite hydrothermalisé en utilisant le résultat de l'analyse quantitative du faciès correspondant au granite hydrothermalisé. Les résultats de la modélisation ont mis en évidence la différence de comportement des deux faciès en faisant apparaître une plus grande sensibilité aux ruptures de la veine de quartz.

Pour l'étude du comportement hydromécanique de la deuxième couronne, le code 3DEC/FLO, après une phase de tests et de débogage, a été mis en œuvre pour la modélisation des stimulations hydrauliques réalisées dans le forage GPK1. Les calculs préliminaires et sa mise en œuvre à différentes échelles, laissent augurer de la possibilité de modéliser les stimulations hydrauliques des puits en mettant en évidence des phénomènes de ruptures dans des fractures présentant une orientation et un pendage favorables par rapport à l'orientation des contraintes principales horizontales. L'étude des lois de comportement hydromécanique des fractures doit se poursuivre ainsi que l'étude de l'influence des conditions aux limites.

Le halo de stimulation et le réservoir sont modélisés à partir d'un code d'écoulement en milieu fracturé (FRACAS) déjà utilisé à Soultz. Avant d'entreprendre les caractéristiques de l'interface entre ce code et le code couplé de la deuxième couronne, une étude comparative des résultats obtenus par les deux codes pour une géométrie de réseau de fractures identique a permis d'affiner les propriétés mécaniques des fractures à rentrer dans le code FRACAS et permettra d'amorcer la réflexion sur les connexions possibles entre les deux codes.

#### **1.3.4. Conclusion**

À l'issue de cette première phase de travaux, les différents éléments de la chaîne de modélisation sont disponibles ainsi que la majeure partie des données de base nécessaires aux différentes modélisations.

#### **1.4. OBJECTIF DE L'ÉTUDE**

L'objectif majeur de la présente convention concernant la modélisation de l'interface puits-échangeur sur le site de Soultz est de mettre en œuvre les différents outils de modélisation aux différentes échelles : première couronne, deuxième couronne et halo de stimulation dans différents contextes à savoir les deux puits GPK1 et GPK2. La finalité de ces travaux est de proposer une chaîne de calculs destinée à modéliser les stimulations hydrauliques dans les contextes géologiques et tectoniques variés.

## 2. Zones d'accès à l'échangeur (1<sup>re</sup> couronne)

La première couronne définie *a priori* comme métrique est la zone où s'établit la connexion entre les chemins potentiels d'écoulement et le forage. Ce sont ces connexions qui sont sollicitées en premier lors des stimulations. Leur nombre limité, leur nature, leur environnement et leurs caractéristiques en font un sous-ensemble spécifique du réseau de fractures qui interceptent le forage. L'objectif de la présente étude est de compléter l'analyse quantitative des faciès rencontrés au niveau des zones d'accès majeures et d'approfondir la modélisation du comportement thermo-hydro-mécanique de ces zones d'accès préalablement entreprise.

### 2.1. ANALYSE QUANTITATIVE DES FACIÈS

L'analyse quantitative des faciès rencontrés au niveau des zones d'accès à l'échangeur se poursuit. Les faciès correspondant aux granites bréchifiés et aux granites cataclasés (cf. ann. 1) ont été échantillonnés et sont en cours d'analyse.

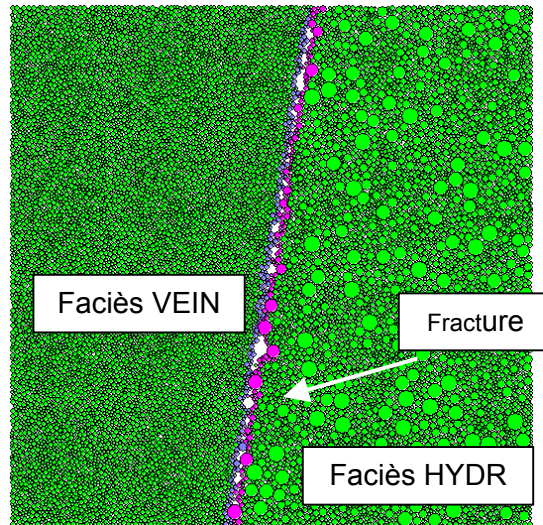
### 2.2. MODÉLISATION THERMO-HYDRO-MÉCANIQUE

La modélisation du comportement thermo-hydro-mécanique des zones d'accès à l'échangeur entrepris au cours des phases précédentes (Gentier *et al.*, 2002 ; Gentier *et al.*, 2003) a été poursuivie en augmentant notamment la taille du modèle et en reprenant les zones d'accès n° 2 et 3 de GPK1 avec différentes variantes de conditions aux limites. Le proche puits (1<sup>re</sup> couronne) est traité au moyen d'un code d'écoulement et d'assemblage de particules (PFC) (cf. ann. 2).

#### 2.2.1. Modélisation de la zone n° 2

La fracture étudiée est localisée à environ 3 221 m de profondeur au sein d'un faciès granitique altéré, composé principalement d'un granite hydrothermalisé (HYDR) au voisinage de la première éponte et d'une veine de quartz (VEIN) au voisinage de la seconde (fig. 6). Le pendage et la direction de pendage qui ont été mesurés pour cette fracture sont respectivement égale à 81° et 42°N.

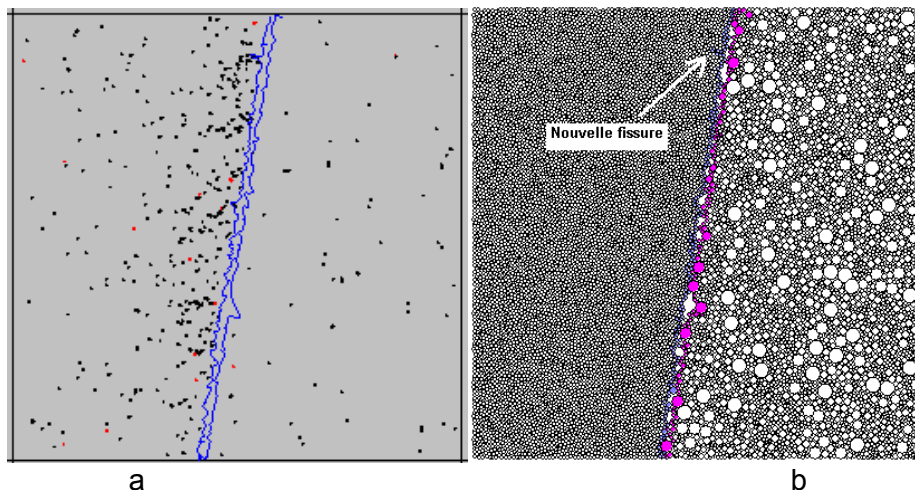
Les conditions aux limites thermiques sont de type adiabatique. La température du milieu est de 150 °C et la température du fluide à 20 °C. Les contraintes initiales sont celles déduites des mesures de Klee et Rummel (1993). Six paliers de pression hydraulique sont appliqués successivement dans la fracture. Le détail des calculs est présenté à l'annexe 3.



**Fig. 6 - Géométrie du modèle correspondant à la fracture perméable de la zone 2 de GPK1.**

Les premiers résultats du modèle, qui confortent ceux obtenus dans l'étude précédente (Gentier *et al.*, 2003), ont montré :

- une sensibilité plus forte du faciès composé exclusivement de particules en quartz face aux sollicitations d'origine thermique qui semblent être à l'origine de la recrudescence des micro-ruptures principalement par traction des liaisons interparticulaires en comparaison au granite hydrothermalisé (fig. 7a).
- la possibilité de développement d'une fissuration nouvelle par un phénomène de coalescence des micro-ruptures qui pourrait par ailleurs expliquer l'augmentation de la porosité locale dans cette zone (fig. 7b).

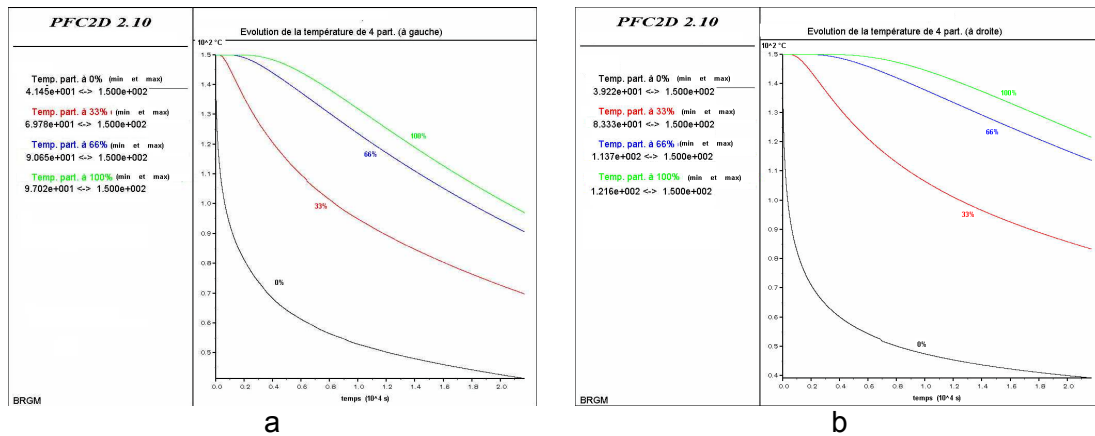


**Fig. 7 - (a) Répartition des ruptures dans le modèle de référence après 1 heure (rouge : rupture en compression ; noir : rupture en traction) ; (b) Initiation d'une nouvelle fissure à partir de l'éponte après 1 heure.**

Cependant, une certaine prudence s'impose quant à l'interprétation des résultats obtenus pour une durée de simulation thermique *a priori* supérieure à une heure. En effet, la température des particules proches des frontières externes du modèle enregistre une baisse peu significative pendant la première heure, soit moins de 3 % de chute pour les particules situées à plus des deux tiers de distance de la fracture (fig. 8a et b).

Au-delà de cette durée, les baisses de températures commencent à devenir significatives et l'analyse des phénomènes peut être influencée par les conditions aux limites mécaniques.

En d'autres termes, les micro-ruptures qui se mettent en place par un mécanisme en traction pourraient être partiellement dues aux conditions en déplacements nuls qui sont imposées.

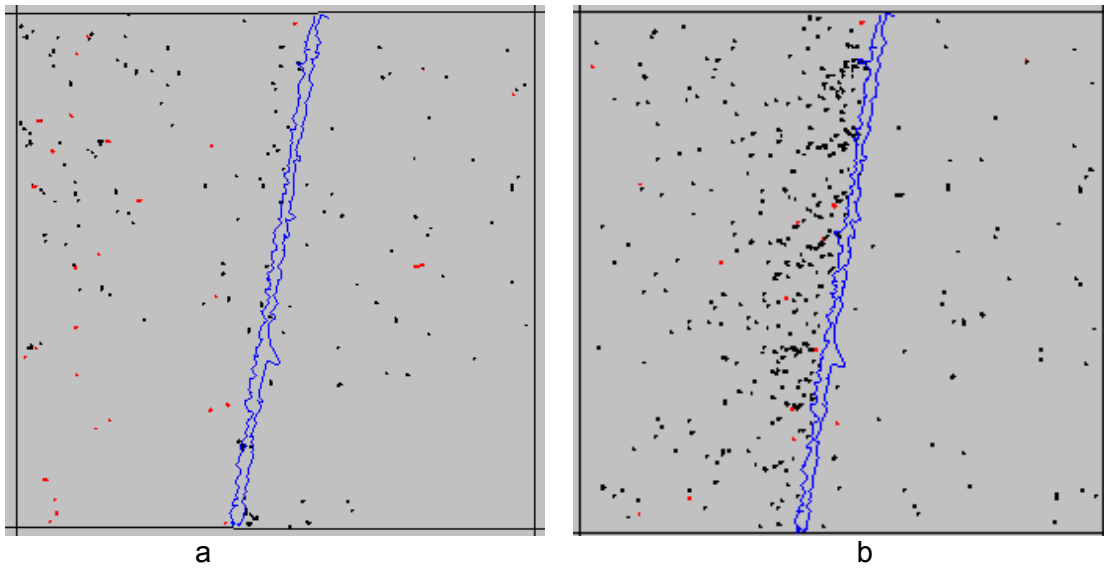


**Fig. 8 - Évolution des températures pour quatre particules situées à des distances de 0 %, 33 %, 66 % et 100 % du centre de gravité du modèle dans les faciès veine de quartz (a) et granite hydrothermalisé (b).**

L'introduction de conditions aux limites mécaniques définies en contrainte conduit à des résultats différents. En effet, les micro-ruptures sont nettement moins nombreuses dans les deux faciès VEIN et HYDR. En moyenne, elles sont dix fois moins nombreuses que dans le modèle précédent (fig. 9).

Dans la configuration actuelle, les contractions d'origine thermique des particules, qui induisent des efforts en tractions au niveau des liaisons interparticulaires, sont compensées par des déformations au niveau des parois externes du modèle nécessaires au maintien des contraintes imposées.

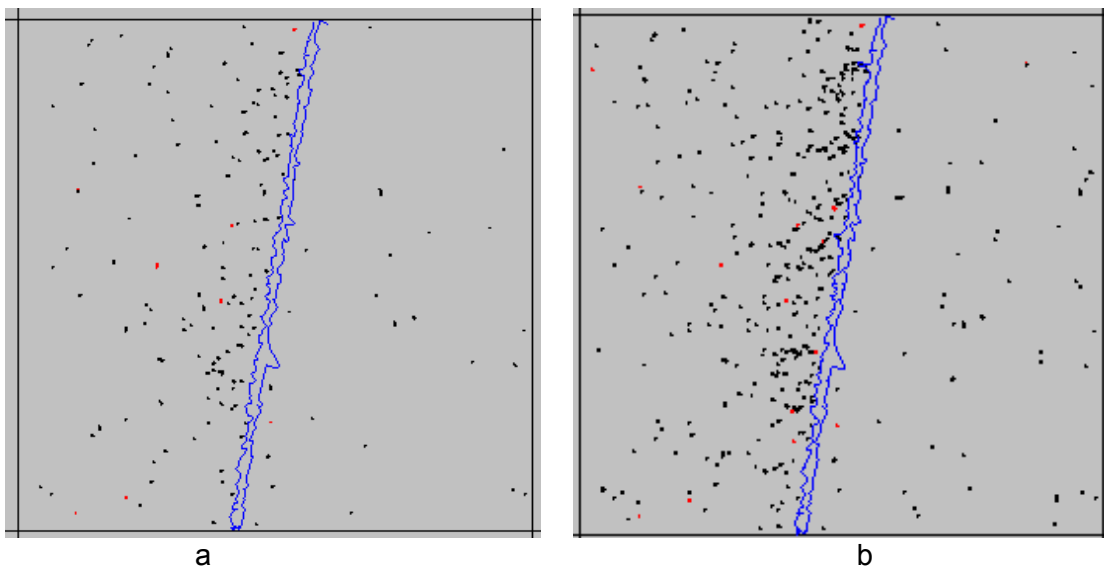
L'introduction de conditions aux limites thermiques de type flux imposé ne modifie pas la réponse du modèle.



(a) conditions aux limites définies en contrainte ; (b) conditions aux limites définies en déplacement.

**Fig. 9 - Répartition des ruptures dans le modèle après 1 heure.**

Par contre, l'injection d'un fluide d'une température de 70 °C diminue le nombre de micro-ruptures. Les micro ruptures sont en moyenne presque deux fois moins nombreuses dans les deux faciès lorsque la température du fluide passe de 20 °C à 70 °C (fig. 10). La réduction des écarts de température entre le fluide et la roche provoque des contractions d'origine thermique des particules qui sont de moindre ampleur. Cependant, la propagation de microfissures par coalescence des micro-ruptures à partir d'une éponte est également observée, mais après un temps de sollicitation thermique un peu plus long (5 h).

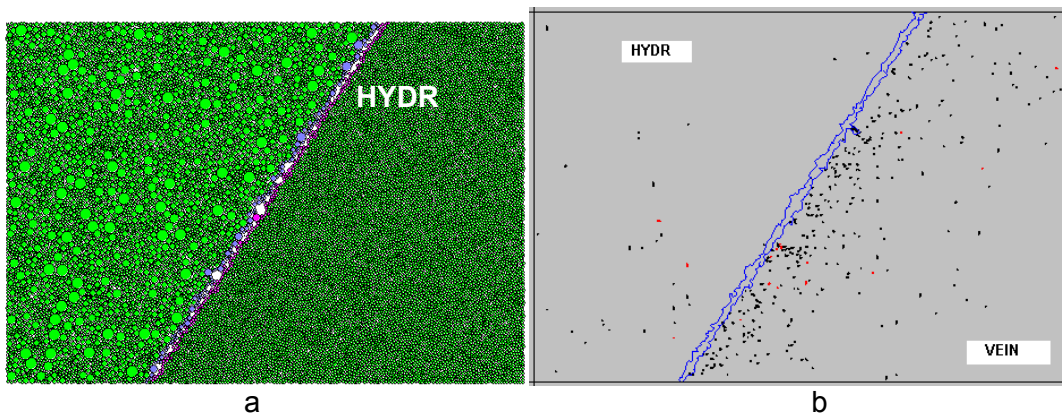


(a) dans l'hypothèse d'un fluide de température initiale de 20 °C ; (b) rouge : rupture en compression ; noir : rupture en traction.

**Fig. 10 - Répartition des ruptures dans le modèle après 1 heure dans l'hypothèse d'un fluide de température initiale de 70 °C.**

### 2.2.2. Modélisation de la zone n° 3

La fracture étudiée est localisée à environ 3 489,5 m de profondeur au sein d'un faciès granitique altéré, composé principalement d'un granite hydrothermalisé (HYDR) au voisinage de la première éponte et d'une veine de quartz (VEIN) au voisinage de la seconde (fig. 11a). Le pendage et la direction de pendage qui ont été mesurés pour cette fracture sont respectivement égale à 57° et 246°N. Elle ne diffère de la précédente que par la profondeur et son pendage. Le détail des calculs est présenté à l'annexe 3.



**Fig. 11 - Géométrie du modèle de la fracture perméable de la zone 3 de GPK1 (a) et répartition des micro-ruptures après 1 heure de sollicitation (b).**

Les mêmes phénomènes que pour la zone d'accès n° 2 sont observés. Les micro-ruptures sont plus nombreuses dans le faciès « veine de quartz » que dans le granite hydrothermalisé et des fissures se propagent à partir de l'éponte de la fracture par coalescence des micro-ruptures (fig. 11b). Cependant, le pourcentage total de micro-ruptures est à temps de sollicitation égal légèrement inférieur à celui obtenu pour la zone d'accès n° 2.

### 2.2.3. Conclusion

L'augmentation de taille du modèle n'a pas modifié la différence de comportement observé antérieurement pour les différentes conditions aux limites mécaniques considérées (contraintes imposées et déplacements imposés).

Les principales conclusions quant à l'influence du faciès sur la réponse thermo-hydro-mécanique restent vraies.

Ce travail a fait l'objet d'une présentation à la Conférence Internationale « Coupled T-H-M-C Processes in Geosystems (GeoProc 2003) » qui s'est tenue à Stockholm (13-15 octobre 2003). La publication est présentée à l'annexe 11.



### 3. Zones fortement stimulées (2<sup>e</sup> couronne)

La zone fortement stimulée directement connectée aux forages d'exploitation par l'intermédiaire des zones d'accès définies ci-dessus correspond à un volume qui a été défini en première approche par l'enveloppe contenant les événements microsismiques associés à leurs stimulations respectives. Si l'on se réfère à cette enveloppe, le volume considéré est pluri-décamétrique à hectométrique et peut donc être considéré comme un cylindre axé sur chacun des forages.

Au cours des travaux antérieurs (Gentier *et al.*, 2002 ; Gentier *et al.*, 2003), un code hydromécanique 3D a été développé par la société Itasca (cf. ann. 6). Après une phase de développement (Gentier *et al.*, 2002) et une phase de tests et de débogage, les premières simulations des stimulations hydrauliques ont été réalisées pour le puits GPK1 (Gentier *et al.*, 2003). Ces premières simulations ont montré que des mécanismes de rupture dans certains plans de fracture d'orientation privilégiée par rapport à la direction des contraintes principales peuvent expliquer l'allure générale des réponses pression-débit enregistrées lors des stimulations.

Dans le cadre de cette étude, la modélisation des stimulations dans GPK1 a été approfondie dans le but de caler au mieux la loi de comportement des zones de failles et leurs caractéristiques hydromécaniques et d'apprécier le rôle de la géométrie du réseau de failles à prendre en compte. Après cette phase de calage, une phase de validation a été entreprise en appliquant les lois et les propriétés hydromécaniques établies à la géométrie du réseau de failles retenue pour le puits GPK2. Faisant suite à la modélisation des stimulations des puits GPK1 et GPK2, la modélisation des tests d'injection post stimulations a été entreprise.

#### 3.1. GÉOMÉTRIE DU RÉSEAU DE FRACTURE

##### 3.1.1. Géométrie du réseau de failles interceptées dans GPK1

Suite aux premières modélisations des stimulations de GPK1, des compléments ont été apportés à la géométrie des réseaux de failles à prendre en compte dans les modélisations. Les premières modélisations des stimulations hydrauliques de GPK1 ont mis en évidence la difficulté de mobiliser hydrauliquement la partie supérieure de l'openhole. Pour tenter d'améliorer la réponse des modélisations, la géométrie du réseau de failles a été reprise et complétée. Les zones de failles intégrées dans les premiers modèles sont récapitulées dans le tableau ci-après (tabl. 1). Une reprise des imageries de forage vers le bas du tubage a permis de mieux caractériser une structure qui avait été mise en évidence lors de la foration (perte de boue, émission de gaz). Cette structure dite fracture n° 0, bien que non directement réactivable en raison de sa position par rapport au tubage, pourrait jouer un rôle par son intersection avec la zone de faille n° 1 (tabl. 1). L'analyse détaillée de cette faille est présentée à l'annexe 4 et montre la structure complexe de celle-ci.

Zone n°	Fracture n°	Profondeur (m)	Pendage (°)	Dir. Pendage (°)			Commentaires
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2 816</b>	<b>70</b>	<b>230</b>			
1	1	2 867	70	297	P	P	Statistiques sur 3 plans à pendage ouest ; forte extension
	2	2 898	48	122	P		Halo d'altération, cisaillement, extension plurimétrique
	3	2 903	78	318		P	Halo d'altération, perméable, cisaillement, extension moyenne
	4	2 965	80	248	P	P	Statistiques sur 3 plans à pendage ouest ; extension moyenne
2	5	3 224	71	88	P	P	extension très forte
	6	3 339	83	274			Fracture induite
3	7	3 498	63	257		P	Statistiques sur 6 plans à pendage ouest ; extension moyenne à forte

**Tabl. 1 - Géométrie des fractures retenues pour la modélisation de la stimulation dans GPK1.**

### 3.1.2. Géométrie du réseau de failles interceptées dans GPK2

Une première analyse de la géométrie du réseau de fractures recoupant l'open hole de GPK2 avait été réalisée dans la première phase des travaux (Gentier *et al.*, 2002 - ann. 1b). Un récapitulatif des zones analysées antérieurement est présenté dans le tableau ci-dessous (tabl. 2). Une analyse plus détaillée de certaines de ces zones a été reprise suite à l'acquisition des nouvelles imageries de paroi enregistrées en 1999. Le détail de cette analyse est présentée à l'annexe 5 et les nouvelles données structurales sont présentées dans le tableau ci-dessous (tabl. 2).

Zones	Profondeur (m)	Dir. Pendage (°) données antérieures	Pendage (°) données antérieures	Participation aux écoulements	Dir. Pendage (°) données réanalysées (cf. annexe 5)	Pendage (°) données réanalysées (cf. annexe 5)
Z1	3 247	68	58 - >65	25 %	93 82	45 69
Z2	3 259	74	72	-		
Z3	3 350	236	87	25 %	245	78
Z4	3 371	238	73	10 %		
Z5	3 470	60	79	25 %	74	79
Z6-a	3 480	276	84	-		
Z6-b	3 500	288	82	10 %	310	72
Z6-c	3 566	68	81	5 %	269 58	83 81

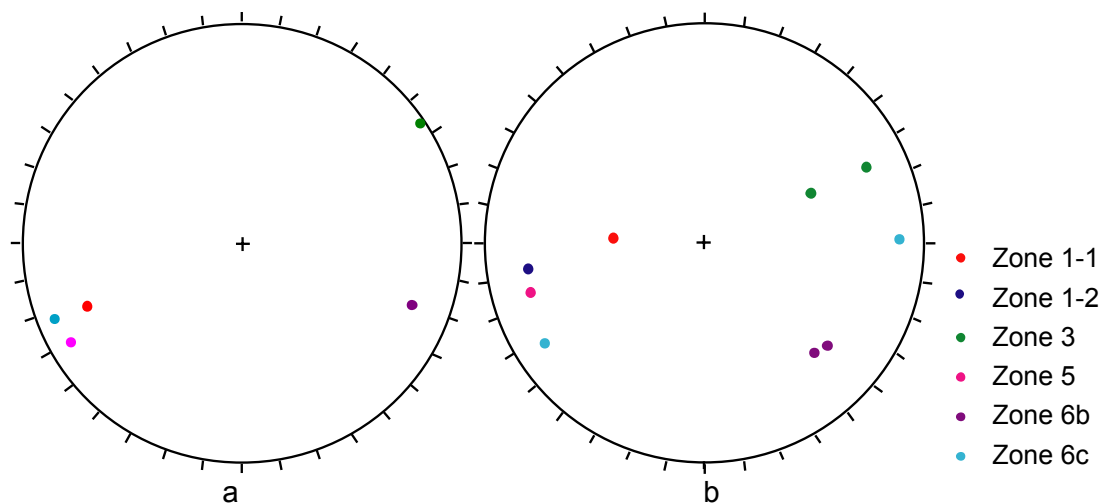
**Tabl. 2 - Géométrie des fractures retenues pour la stimulation dans GPK2.**

Au vu de cette nouvelle analyse, les zones 1 et 3 apparaissent comme des fractures individuelles bien marquées, alors que les zones plus profondes (zones 5, 6b et 6c) sont constituées d'un certain nombre de fractures fines et peu marquées.

Par rapport à l'analyse réalisée d'après les imageries de 1995 (Gentier *et al.*, 2002 - ann. 1b), les orientations des fractures mesurées dans un cas comme dans l'autre sont équivalentes en ce qui concerne les directions.

En revanche, les inclinaisons apparaissent plus importantes pour les mesures anciennes de 1995 (fig. 12). Cette différence provient du fait que les images étaient de moins bonne qualité et certaines interprétations difficiles à réaliser. Ainsi, certains pendages ont été exagérés.

Par ailleurs, outre la qualité des enregistrements de 1999 qui a facilité l'interprétation et permis d'interpréter un plus grand nombre de structures, les stimulations antérieures du puits ont mis en évidence des fractures plus ou moins colmatées et donc plus difficiles à distinguer sur les imageries de 1995.

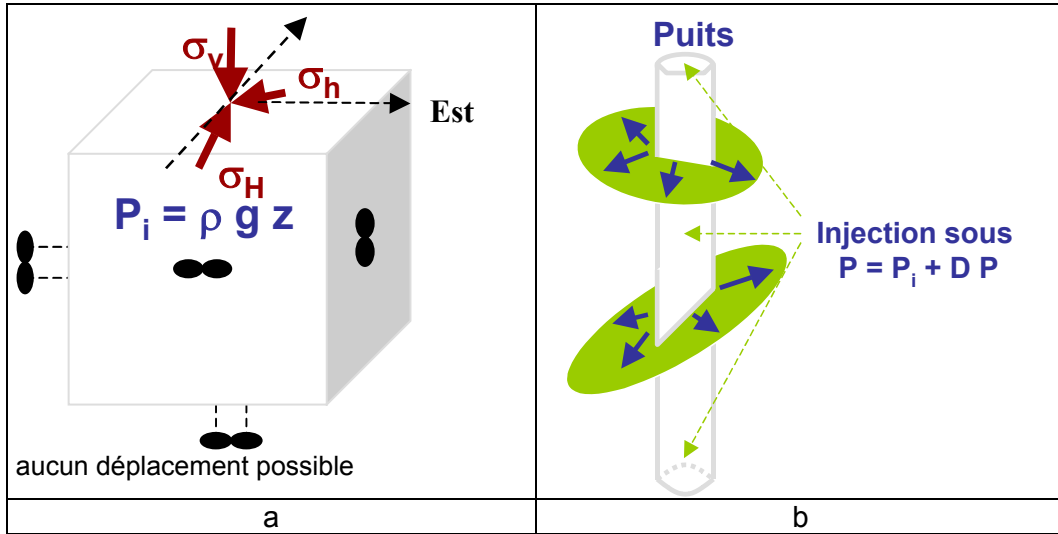


(a) orientation des zones mesurées dans les imageries de 1995 et retenues pour la modélisation ; (b) valeurs moyennes retenues suite à la réinterprétation des imageries de 1999.

**Fig. 12 - Orientation des différentes zones de failles dans GPK2.**

### 3.2. MODÉLISATION DES STIMULATIONS

Suite aux premières modélisations de GPK1 (Gentier *et al.*, 2003), les conditions aux limites retenues pour cette première phase de travaux sont définies en déplacement (fig. 13a).



**Fig. 13 - Définition des conditions aux limites (a) et du modèle d'injection au puits (b) pour les deux types de modèles réalisés.**

D'un point de vue mécanique, le modèle a été chargé initialement par le champ de contraintes établi à Soultz-sous-Forêts entre 1 458 m et 3 500 m de profondeur (Klee et Rummel, 1993), dont l'expression est rappelée ci-dessous. La direction de la contrainte horizontale majeure est N170°E.

$$\begin{aligned} \sigma_h &= 15,8 + 0,0149 (z-1458) \\ \sigma_H &= 23,7 + 0,0336 (z-1458) \quad [\text{en MPa}] \\ \sigma_v &= 33,8 + 0,0255 (z-1377) \end{aligned}$$

D'un point de vue hydraulique, un champ de pressions hydrostatique égale à  $\rho \cdot g \cdot z$  ( $\rho$  : masse volumique de l'eau,  $g$  : la gravité et  $z$  : la profondeur) est appliqué initialement dans toutes les fractures (fig. 13a).

Les sollicitations hydrauliques sont appliquées par incrément de la pression hydraulique dans les puits (fig. 13b).

Les blocs ont un comportement élastique et linéaire de paramètres égaux à ceux d'un granite sain (tabl. 3). Ils sont supposés imperméables.

	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Module de Young (MPa)	Coeff. De Poisson $\nu$
Blocs	2 680	52 000	0,29

**Tabl. 3 - Paramètres élastiques des blocs supposés en granite dans les modèles.**

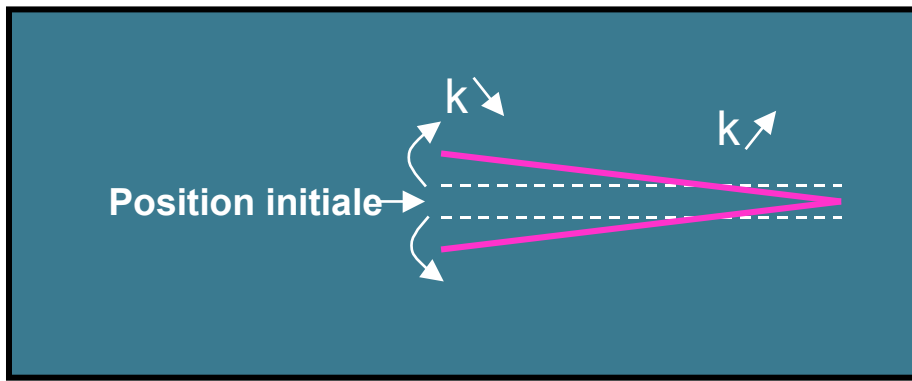
Les discontinuités sont supposées se déformer selon une loi de comportement élastoplastique avec un endommagement des aspérités. Les déformations élastiques sont contrôlées par les raideurs tangentielle et normale des fractures. Dans cette phase de travail, contrairement aux modélisations antérieures (Gentier *et al.*, 2003), les

raideurs sont supposées variables et évoluent en fonction des contraintes normales qui sont appliquées sur les épontes (fig. 14) selon les relations suivantes :

$$K_n = K_{n0} * \sigma_n^a$$

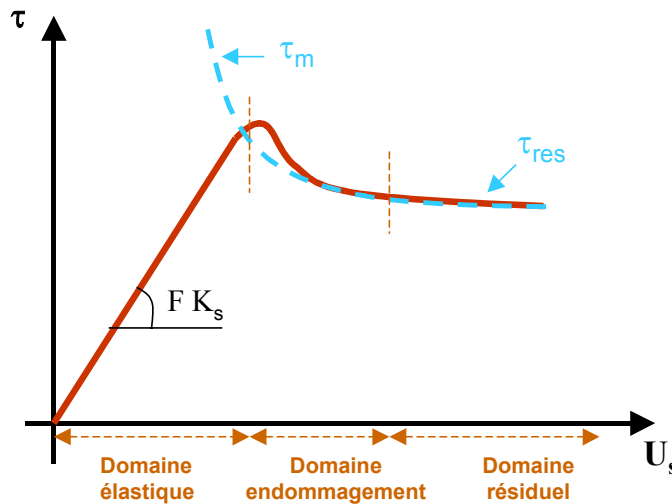
$$K_s = K_{s0} * \sigma_n^b$$

$K_n$  (resp.  $K_s$ ) : raideur normale (resp. tangentielle),  $K_{n0}$  (resp.  $K_{s0}$ ) : raideur normale (resp. tangentielle) initiale,  $\sigma_n$  : contrainte normale,  $a$  et  $b$  des constantes définies par les mesures en laboratoire. En l'absence de données, des hypothèses ont été posées pour la définition de chacune des constantes. Ainsi, dans tous les calculs qui vont suivre les valeurs de  $a$  et  $b$  sont supposées égales à 1 ; celles de  $K_{n0}$ ,  $K_{s0}$  sont égales à 20 000 MPa/m.



**Fig. 14 - Évolution de la rigidité en fonction de l'ouverture progressive de la fracture.**

Le comportement plastique est défini par un angle de frottement initial marquant la limite élastique, et un angle de frottement résiduel qui caractérise la dégradation complète des aspérités (fig. 15).

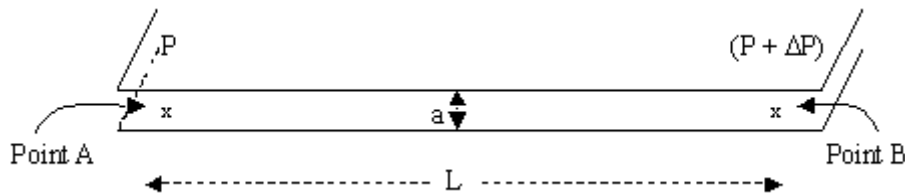


**Fig. 15 - Modèle de comportement des fractures dans l'hypothèse d'un endommagement continu.**

D'un point de vue hydraulique, les écoulements dans le modèle obéissent à la loi cubique dont l'expression est rappelée ci-dessous :

$$Q = (1/12\mu) * a^3 * (\Delta P/L) \quad (1)$$

Q : débit (m<sup>3</sup>/s) ;  $\mu$  : la viscosité du fluide ; a : l'ouverture hydraulique ;  $\Delta P$  : variation de la pression de fluide entre les deux points A et B ; L : la longueur du domaine où la variation de pression est appliquée (fig. 16).



**Fig. 16 - Paramètres intervenant dans la loi cubique.**

Dans le modèle, l'ouverture hydraulique est liée à l'ouverture mécanique par l'expression suivante :

$$a = a_0 + \Delta u_n$$

$a_0$  : ouverture hydraulique initiale définie par l'utilisateur.

$\Delta u_n$  : déplacement normal calculé (variable) dont l'expression est donnée par l'équation ci-dessous.

$$\Delta u_n = \Delta \sigma_n / k_n$$

$\Delta \sigma_n$  : variation de la contrainte normale appliquée sur les épontes de la fracture et  $k_n$  la raideur normale.

La loi cubique utilisée dans le modèle (cf. éq. 1) montre que les débits calculés sont extrêmement sensibles aux variations des ouvertures hydrauliques qui elles-mêmes dépendent des ouvertures mécaniques.

### 3.2.1. Modélisation de la stimulation de GPK1

Les différents calculs réalisés antérieurement (Gentier *et al.*, 2003) ont été poursuivis afin d'arriver à :

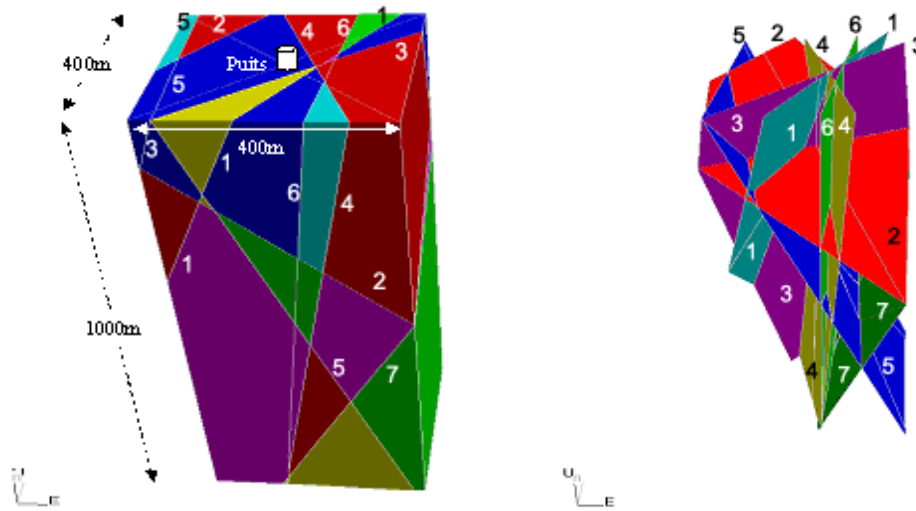
- un ajustement le plus fin possible entre les courbes pression-débit calculées et expérimentales des stimulations hydrauliques ;
- une répartition des flux théoriques dans les fractures stimulées en cohérence avec les résultats des logs de débitmétrie réalisés dans le forage.

L'objectif des deux premiers modèles (modèles 4 et 5) est d'introduire une loi d'endommagement continu avec une raideur variable et d'ajuster au mieux les paramètres hydromécaniques. Les modèles suivants (modèles 6 et 7) sont destinés à

montrer l'influence de l'orientation d'une des fractures (fracture n° 1) tout en continuant à tester différents ensembles de propriétés hydromécaniques. Enfin les derniers modèles (modèles 8, 9 et 10) sont destinés à étudier l'impact d'une connexion entre une des fractures stimulées (fracture n° 1) avec une fracture très perméable (fracture n° 0) n'intersectant pas la partie découverte du puits. Le détail de tous ces calculs est présenté à l'annexe 7.

Remarque : Les modèles sont numérotés dans la continuité des travaux antérieurs (Gentier *et al.*, 2003) pour chacun des puits.

La géométrie du réseau de fracture pris en compte dans les différentes modélisations est celle définie antérieurement, rappelée au tableau 1 et illustrée à la figure 17.



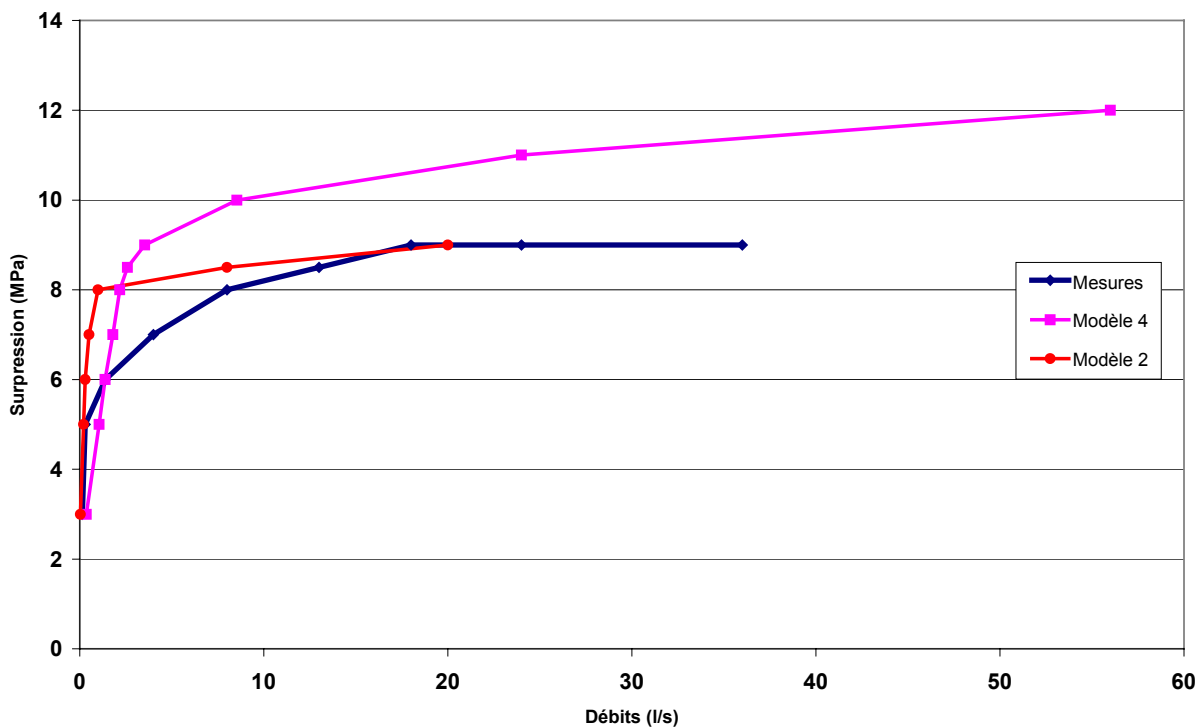
**Fig. 17 - Géométrie du réseau de fracture pris en compte dans les modélisations des stimulations de GPK1.**

Les propriétés hydromécaniques sont récapitulées dans le tableau 4 ci-dessous pour les sept modèles présentés dans cette étude.

	$K_{n,min}$ (MPa/m)	$K_{n,max}$ (MPa/m)	$K_{s,min}$ (MPa/m)	$K_{s,max}$ (MPa/m)	Frot. Initial	Frot. Résid	Rugosité	$a_{res}$	$a_0$	$a_{max}$
Modèle 4	80 000	150 000	80 000	150 000	50°	35°	10 mm	$10^{-8}m$	$6 \cdot 10^{-7}m$	$10^{-3}m$
Modèles 5, 7	80 000	150 000	80 000	150 000	45°	35°	10 mm	$10^{-8}m$	$6 \cdot 10^{-7}m$	$10^{-3}m$
Modèles 6, 8, 9, 10	80 000	180 000	80 000	180 000	50°	35°	10 mm	$10^{-8}m$	$6 \cdot 10^{-7}m$	$10^{-3}m$
Modèle 9, 10 (F0)	80 000	180 000	80 000	180 000	40°	35°	10 mm	$10^{-4}m$	$5 \cdot 10^{-4}m$	$2 \cdot 10^{-3}m$

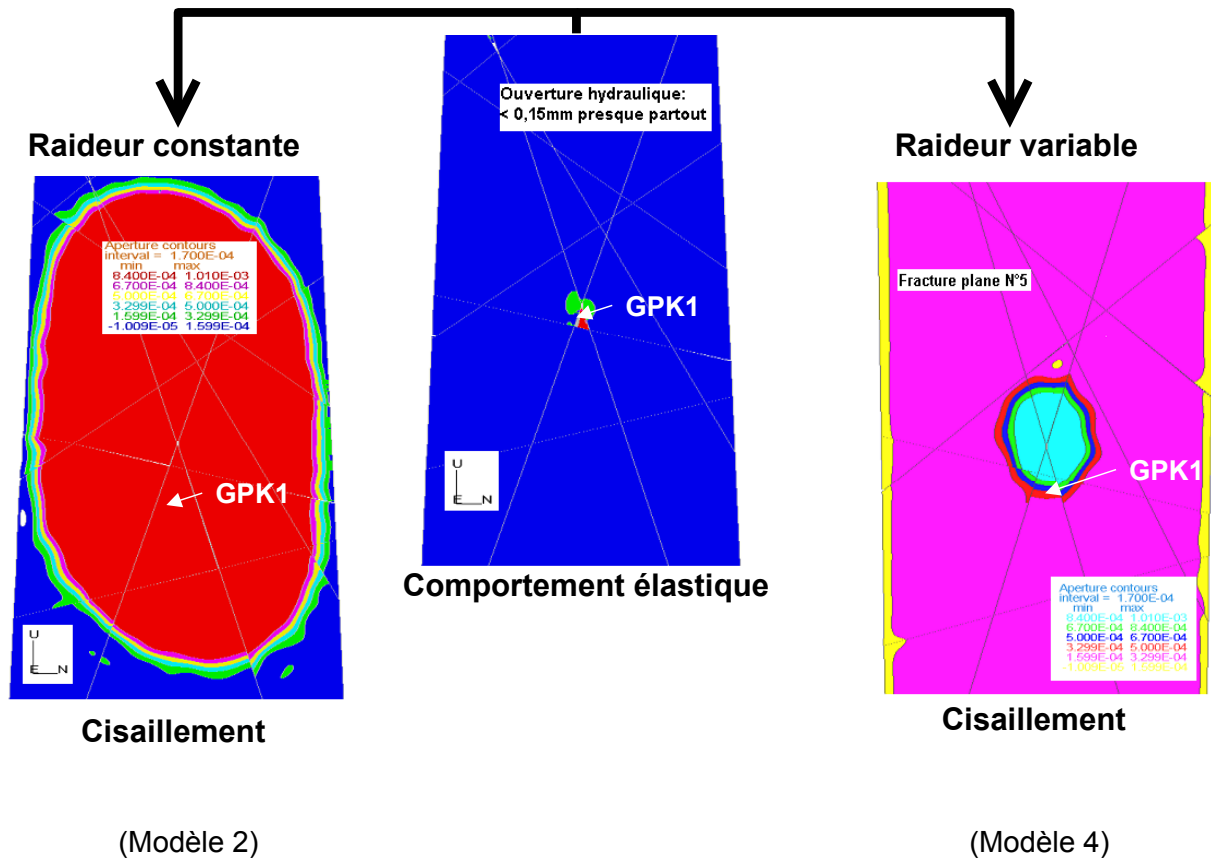
**Tabl. 4 - Propriétés hydromécaniques retenues pour la loi d'endommagement continu à raideur variable introduite dans les différents modèles.**

L'introduction d'une loi d'endommagement à raideur variable a permis une amélioration qualitative du comportement hydraulique calculé notamment dans la première partie de la courbe en diminuant la pente dans la zone de comportement élastique et en adoucissant le passage du comportement élastique à la rupture (fig. 18). Contrairement aux calculs antérieurs (cf. modèle 2, Gentier *et al.*, 2003), le radoucissement progressif des raideurs en fonction des contraintes a eu comme effet un relâchement progressif des contraintes de cisaillement dans les zones à fortes pressions hydrauliques (zones à proximité du puits), et un report sur les zones en aval où les contraintes de cisaillement augmentent.



**Fig. 18 - Influence de la raideur variable dans la loi de comportement sur les courbes pression-débit calculées et comparaison avec les données expérimentales.**

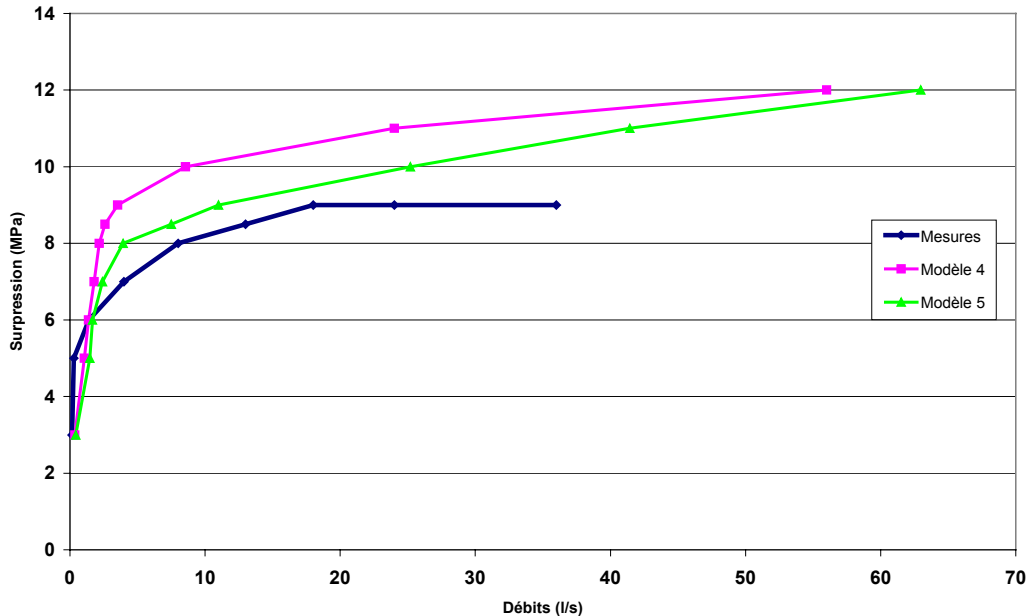
La modification dans le comportement des plans de fractures est illustrée à la figure 19. Le comportement à la rupture plus brutal dans le cas d'une raideur constante qui conduisait à une propagation soudaine et sur la quasi-intégralité du plan de fracture du phénomène de rupture est radouci et conduit à une extension plus limitée des cisaillements. Dans la phase élastique, le comportement reste le même et n'est que fonction des raideurs introduites.



**Fig. 19 - Influence de la raideur variable sur l'extension de l'ouverture dans le plan d'une fracture stimulée.**

Cependant, les valeurs des surpressions pour un débit d'injection donné sont très vite au-dessus des valeurs expérimentales et restent décalées d'environ 2 MPa. La réduction de cet écart a été tentée en diminuant l'angle de frottement initial introduit dans la loi de comportement (fig. 20). Cependant, si la réduction de l'angle de frottement (modèle 5) améliore la réponse dans la première partie de la courbe pression-débit, au-delà d'une surpression de 9 MPa, les débits deviennent beaucoup plus grands que ceux calculés dans le modèle précédent (modèle 4) à surpression égale dans le puits et dépassent largement les valeurs mesurées expérimentalement.

Si ces dernières simulations ont confirmé qu'une loi de comportement à raideur variable semble la mieux adaptée en donnant des résultats plus cohérents d'un point de vue qualitatif et quantitatif avec ceux obtenus par les essais qui ont été réalisés dans le forage GPK1, les différentes simulations ont toutes montré que la partie haute de la zone stimulée (zone de la fracture n° 1) ne réagit pas aux stimulations hydrauliques.

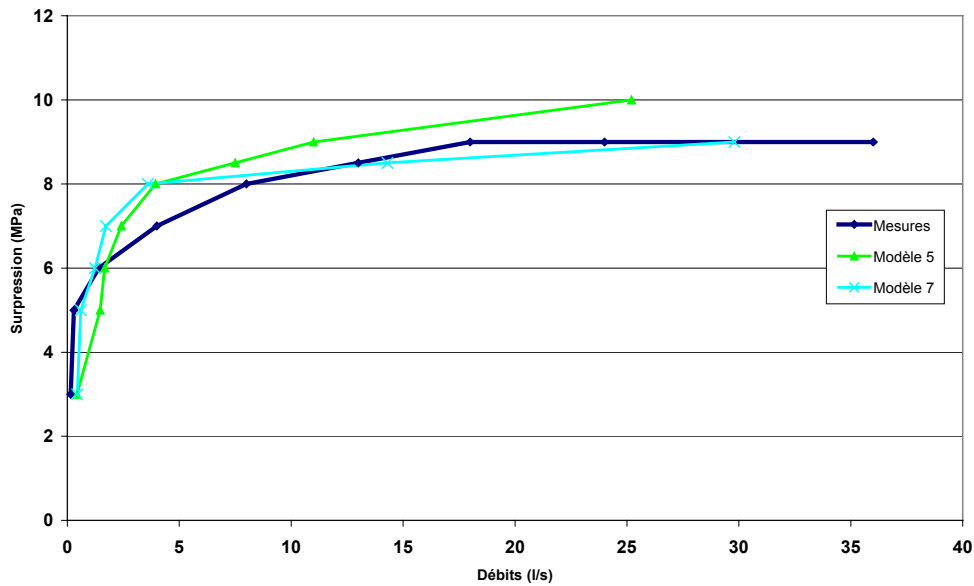


**Fig. 20 - Courbes pression-débit calculées à partir des modèles 4 et 5 et comparaison avec les données expérimentales.**

Ces mêmes calculs ont également mis en évidence une corrélation entre les contraintes naturelles *in situ* et les orientations des fractures potentiellement favorables aux écoulements. Ainsi, en supposant que les contraintes *in situ* ont été déterminées avec précision, il est probable que l'orientation qui a été définie pour la fracture n° 1 dans le modèle ne soit pas représentative de la zone 1 connue pour sa forte participation dans les écoulements. Pour étudier cette hypothèse, le modèle a été reconsidéré en modifiant la géométrie de la fracture n° 1. Elle a été supposée dans ce cas avoir une direction de pendage égale à 283 °E au lieu de 297 °E.

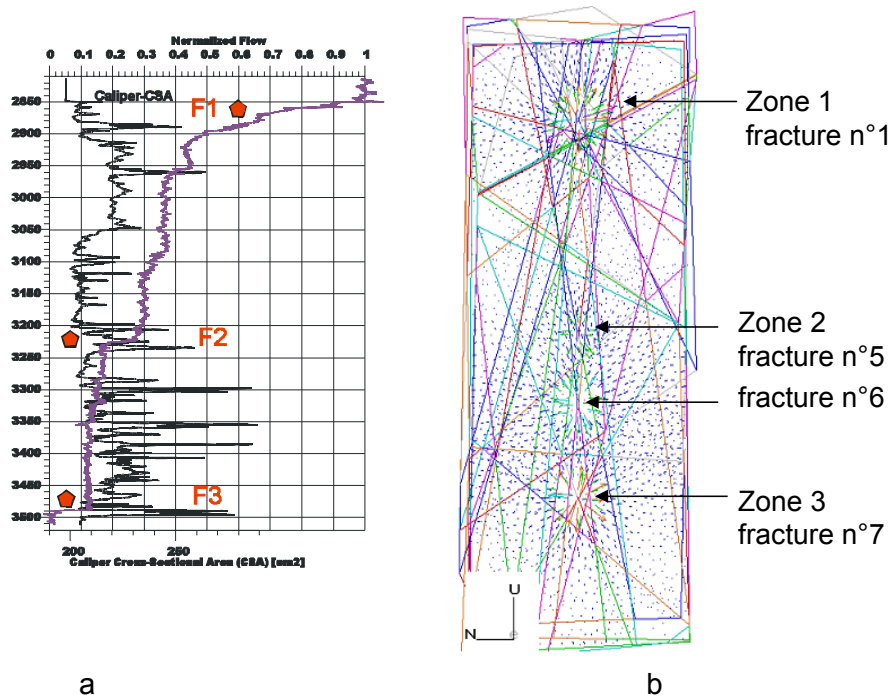
À partir de la modification de la direction de la fracture n° 1, deux modèles ont été envisagés en considérant deux jeux de propriétés mécaniques des fractures (modèles 6 et 7). La rigidification des fractures associée à la modification de l'orientation de la zone 1 n'a pas conduit à un résultat satisfaisant notamment au niveau des fractures stimulées (modèle 6). Seules les fractures n° 1 et 6 ont alors été réactivées.

Un retour à des valeurs de rigidité plus faibles (150 000 MPa) et à un angle de frottement de 45°, toujours avec modification de la direction de la zone 1 (modèle 7) conduit à une réponse pression-débit beaucoup plus proche des données expérimentales (fig. 21) et meilleure que la réponse obtenue avec le modèle présentant les mêmes propriétés mécaniques sans modification de la géométrie de la zone 1 (modèle 5).



**Fig. 21 - Influence de l'orientation d'une des fractures sur la courbe pression-débit des stimulations hydrauliques.**

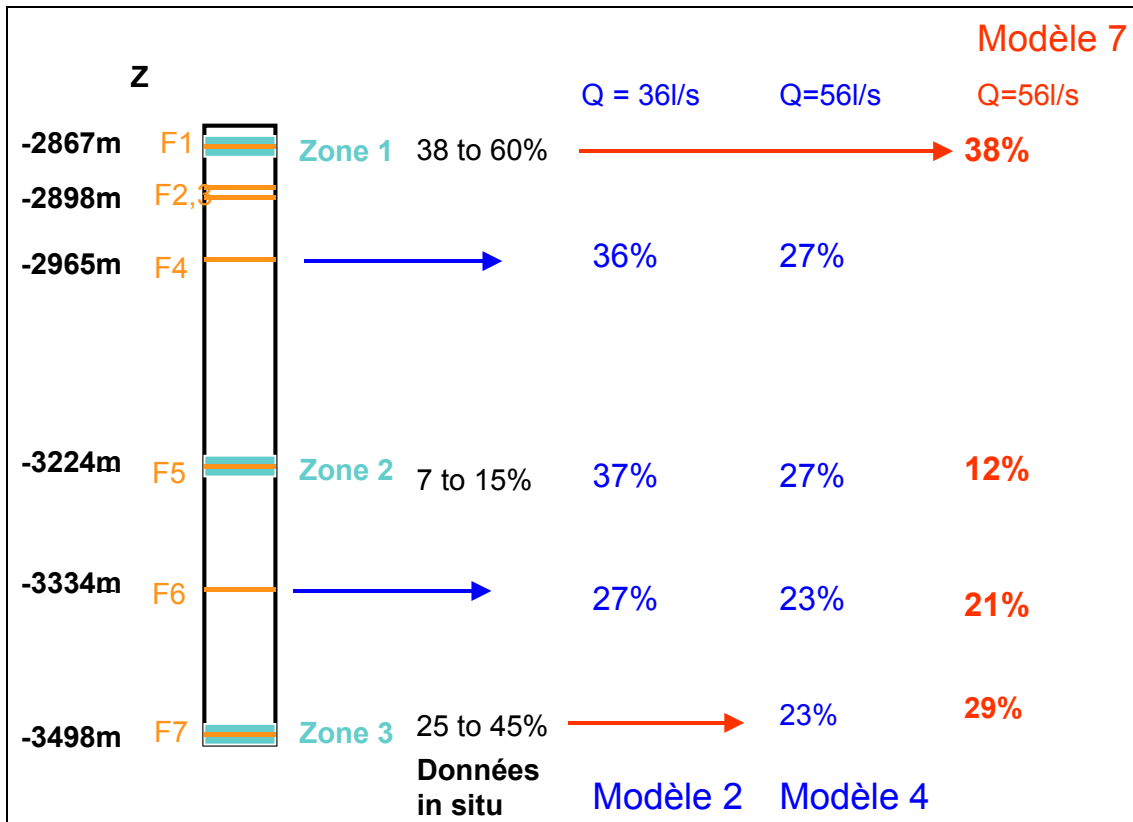
Si la réponse globale calculée en terme de pression-débit s'approche nettement de la courbe expérimentale, il n'en demeure pas moins que le passage du comportement élastique à la rupture est encore un peu trop brutal et que le débit calculé pour une surpression de 9 MPa est encore nettement trop fort. Par ailleurs, la répartition des flux dans les différentes zones de failles stimulées correspondant à ce dernier modèle, schématisée à la figure ci-dessous (fig. 22), met en évidence une stimulation de la fracture n° 6 supérieure à celle de la fracture n° 5, contrairement à ce qui est observé sur logs de débitmétrie.



(a) log de débitmétrie ; (b) répartition des flux dans le modèle 7.

**Fig. 22 - Répartition des flux dans la partie ouverte de GPK.**

Enfin, l'influence des lois de comportement hydromécanique et des paramètres associés ainsi que de l'orientation des failles est illustrée à la figure 23 au travers de la répartition des flux dans les différentes fractures stimulées pour les principales phases de la modélisation.



Modèle 2 : raideur constante ; modèle 4 : raideur variable ; modèle 7 : raideur variable et modification de l'orientation de la fracture n° 1.

**Fig. 23 - Récapitulatif de la répartition des flux dans l'open hole de GPK1 pour les principales étapes de la modélisation**

Enfin, le problème posé par la stimulation de la partie haute de l'open hole qui a trouvé une solution dans une légère modification de l'orientation de la fracture n° 1 (modèle 7) a été reconsidéré en prenant en compte une possible connexion entre la fracture n° 1 et une zone de faille bien identifiée et très perméable située une quarantaine de mètres au-dessus (fracture n° 0) mais ne recoupant pas la partie découverte du puits. L'introduction de cette faille supplémentaire (cf. § 3.1.1 et ann. 4) dans le réseau de fractures initial a fait l'objet de trois modélisations (modèles 8, 9 et 10) prenant en compte :

- orientation initiale de la fracture n° 1 (modèle 8) ;
- orientation initiale de la fracture n° 1 et augmentation de perméabilité de la fracture n° 0 (modèle 9) ;
- modification de l'orientation de la fracture n° 1 (modèle 10).

Seul le dernier modèle a permis la stimulation de la fracture n° 1, ce qui est parfaitement cohérent avec les résultats des modélisations précédentes (modèle 7).

À ce stade de l'étude, les résultats correspondant aux modèles avec une fracture supplémentaire localisée à quelques dizaines de mètres au-dessus de la zone perméable proche de la fracture n° 1, aboutissent aux conclusions suivantes :

- soit la zone haute du forage GPK1 (représentée par la fracture n° 1) est naturellement ouverte, c'est dire déjà très perméable avant la stimulation, ce qui expliquerait sa forte perméabilité ;
- soit elle ne l'est pas, et dans ce cas elle serait orientée plus favorablement par rapport aux contraintes principales, ce qui est montré par le modèle.

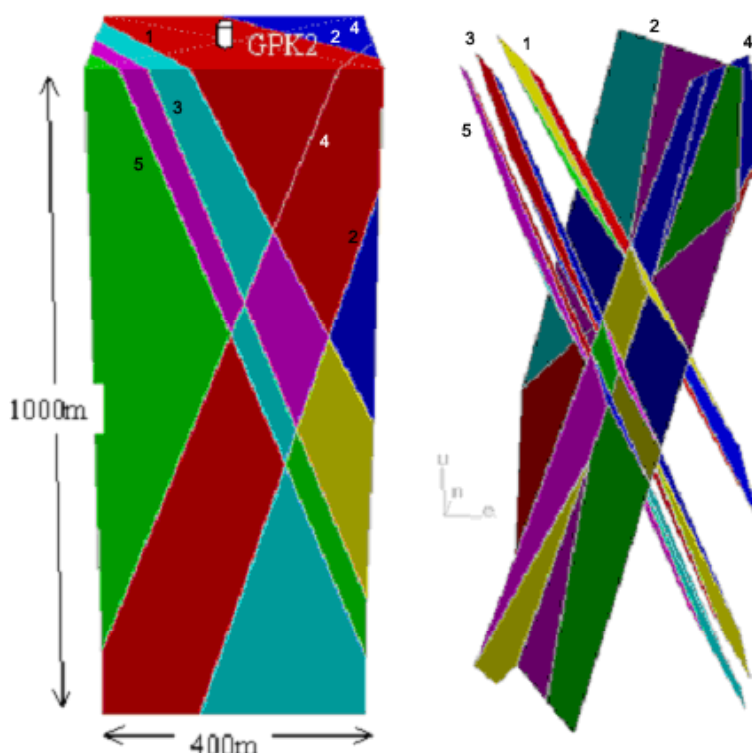
### 3.2.2. Modélisation de la stimulation de GPK2

La démarche adoptée pour l'étude de GPK2 diffère légèrement de celle qui a été adoptée pour GPK1. En effet, la définition de la loi de comportement des fractures et la mise au point d'un jeu de paramètres hydromécaniques fait partie des résultats importants obtenus par le modèle au cours de l'étude de l'essai de stimulation de GPK1. Ces paramètres ont été pris en compte dans le modèle de GPK2 afin de tester leur domaine de validité. Ainsi, à ce stade, la modélisation de l'essai de stimulation de GPK2 s'inscrit d'avantage dans une démarche prédictive du comportement hydraulique mesuré, et non pas celle d'un calage de ce dernier comme cela a été réalisé pour GPK1. Par conséquent, le modèle a été d'abord utilisé pour évaluer le comportement hydraulique obtenu dans GPK2 en se basant sur une comparaison entre les courbes (pression-débit) calculée et mesurée, ainsi que sur les données des logs de débitmétrie. Le détail de tous ces calculs est présenté à l'annexe 8.

La géométrie du réseau de fractures (fig. 24) pris en compte dans la modélisation est celle définie antérieurement (Gentier *et al.*, 2001) et rappelée au tableau 5 avant reprise des données structurales à partir des nouvelles imageries de 1999.

Zones	Profondeur (m)	Dir. Pendage (°)	Pendage (°)	Participation aux écoulements	Fractures retenues dans le modèle
Z1	3 247	68	58 - >65	25 %	Oui (F1)
Z2	3 259	74	72	-	Non
Z3	3 350	236	87	25 %	Oui (F2)
Z4	3 371	238	73	10 %	Non
Z5	3 470	60	79	25 %	Oui (F3)
Z6-a	3 480	276	84	-	Non
Z6-b	3 500	288	82	10 %	Oui (F4)
Z6-c	3 566	68	81	5 %	Oui (F5)

**Tabl. 5 - Paramètres géométriques des fractures majeures rencontrées dans le forage GPK2..**



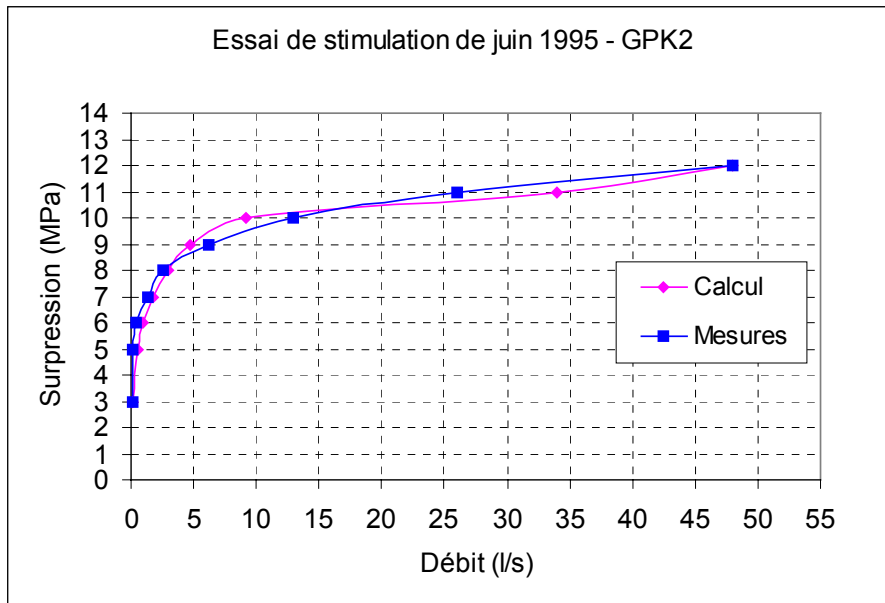
**Fig. 24 - Géométrie du réseau de fracture pris en compte dans les modélisations des stimulations de GPK2.**

Les paramètres hydromécaniques mis en œuvre dans le modèle pour simuler le comportement des fractures sont résumés dans le tableau ci-dessous (tabl. 6). Deux jeux de paramètres ont été testés.

	$K_{n,min}$ (MPa/m)	$K_{n,max}$ (Mpa/m)	$K_{s,min}$ (MPa/m)	$K_{s,max}$ (MPa/m)	Frot. Initial	Frot. Résid	rugosité	$a_{res}$	$a_0$	$a_{max}$
Modèle 1	80 000	180 000	80 000	180 000	50°	35°	10 mm	$10^{-8}$ m	$6 \cdot 10^{-7}$ m	$10^{-3}$ m
Modèle 2	80 000	150 000	80 000	150 000	45°	35°	10 mm	$10^{-8}$ m	$6 \cdot 10^{-7}$ m	$10^{-3}$ m

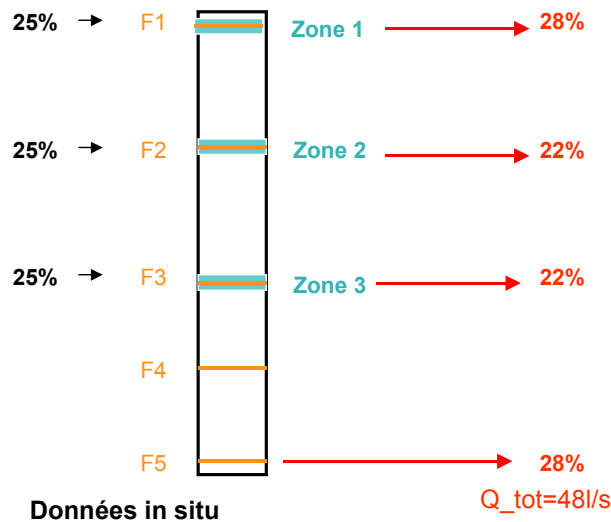
**Tabl. 6 - Paramètres hydromécaniques des fractures.**

Le comportement hydraulique global à la fin de la simulation qui est obtenu avec le comportement le plus raide (modèle 1) a montré une cohérence significative entre les calculs et les mesures (fig. 25). En effet, les débits calculés et mesurés pendant l'essai de stimulation sont qualitativement et quantitativement assez proches.



**Fig. 25 - Courbes pression-débit calculées et mesurées au cours de la stimulation de GPK2.**

La répartition des flux dans les fractures stimulées est en parfaite cohérence avec le log de débitmétrie réalisé (fig. 26).



**Fig. 26 - Répartition des flux dans la partie ouverte de GPK2.**

Un autre modèle intégrant la géométrie du réseau de fractures réinterprété à partir des imageries de 1999 est en cours de réalisation.

### 3.2.3. Conclusion

Les essais hydrauliques, réalisés respectivement dans les deux forages GPK1 et GPK2 en 1993 et 1995, ont permis de mesurer *in situ* les variations des débits et des pressions d'injections dans les deux puits pendant toute la durée des stimulations. De manière générale, les résultats des mesures ont montré une forte augmentation irréversible de la perméabilité des fractures lorsque les pressions d'injections sont suffisamment élevées, et un accès des fluides du puits vers l'échangeur à travers seulement quelques zones privilégiées.

Pour analyser ce comportement hydraulique et comprendre les mécanismes qui en sont à l'origine, l'étude qui vient d'être présentée s'est appuyée essentiellement sur la modélisation hydromécanique en milieu fracturé. Les calculs ont été menés grâce au code de calcul 3DEC-FLO (Itasca, 2000) qui est basé sur la méthode dite des éléments distincts.

Des modèles représentatifs ont été mis au point, respectant dans les limites supportées par les capacités des ordinateurs le contexte géologique présent autour des deux puits. Les résultats obtenus par les différents modèles qui peuvent être soulignés au stade actuel de l'étude sont les suivants :

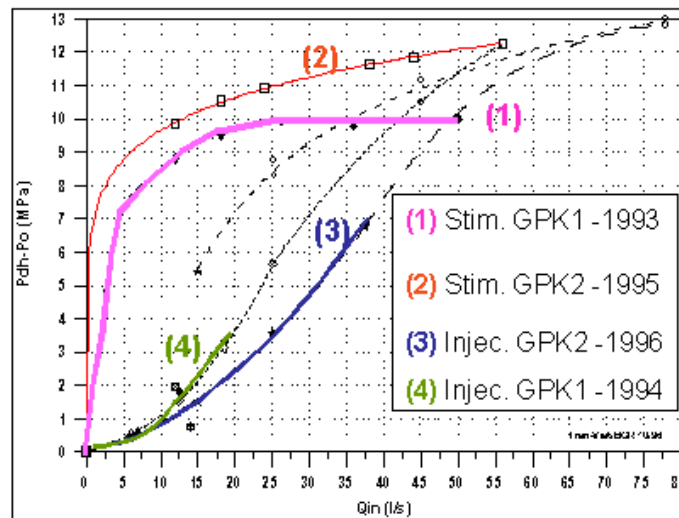
- une corrélation significative a été mise en évidence entre l'orientation des fractures stimulées et celle des contraintes principales. En effet, la stimulation hydraulique serait plus favorable pour les fractures qui ont une orientation proche de celle de la contrainte principale maximale horizontale. L'exemple de la zone haute du forage GPK1 illustre assez bien ce résultat ;
- l'augmentation brusque de la perméabilité du massif coïncide à chaque fois avec la mise en place des ruptures par cisaillement dans les plans de fractures. Il semblerait alors fort probable que le mécanisme de rupture par cisaillement soit à l'origine du phénomène observé par les mesures. Par ailleurs, ce mécanisme se met en place de façon irréversible, ce qui pourrait également expliquer le comportement irréversible constaté à l'issue des essais ;
- un pas important a été franchi dans la caractérisation des paramètres numériques qui régissent le comportement hydromécanique des fractures dans le modèle. En effet, la démarche progressive qui a été adoptée dans cette étude a abouti à la mise au point d'un jeu de paramètres ayant donné des résultats satisfaisants dans l'étude qui a été consacrée à la prédiction des mesures réalisées pendant l'essai de stimulation du forage GPK2 ;
- cette étude a mis en exergue l'importance des données initiales recueillies sur le terrain, en particulier celles portant sur les contraintes naturelles et sur la géologie structurale. La qualité des résultats du modèle et leur fiabilité en est essentiellement tributaire.

Les résultats obtenus à ce jour sont encourageants. Cependant il reste encore des questions en suspens qui sont en cours dans le cadre de cette convention.

### 3.3. MODÉLISATION DES INJECTIONS POST STIMULATIONS

#### 3.3.1. Objectif

Le succès des opérations de stimulations a été confirmé par les essais d'injections qui ont été menés postérieurement dans ces deux forages, pendant lesquels des débits importants ont pu être injectés sous de faibles surpressions en tête de puits (fig. 27). Ainsi, un débit de l'ordre de 15 l/s a pu être injecté dans le forage GPK2 sous une augmentation de pression de seulement 1,5 MPa. De même, une surpression de moins de 2 MPa a suffi pour injecter près de 12,5 l/s dans le forage GPK1.



**Fig. 27 - Essais d'injections post-stimulation réalisés dans GPK1 (juillet 1994) et GPK2 (septembre 1996).**

Ces essais post-stimulations ont montré que l'augmentation de la perméabilité du massif est atteinte de façon permanente, mais également, ils témoignent fortement de l'irréversibilité du mécanisme qui en est à l'origine.

Jusqu'à présent, les modèles mis en œuvre ont permis de mettre en évidence le lien qui existerait entre l'augmentation de la perméabilité globale du massif et la mise en place de mécanismes de rupture par cisaillement des fractures. Néanmoins, il reste encore à établir si l'irréversibilité de ces mécanismes de rupture, qui par ailleurs se traduit dans le modèle par l'apparition de déformations permanentes dans les plans de fracture, est responsable de l'augmentation irréversible de la perméabilité.

Pour tenter de répondre à cette question par la modélisation numérique, le modèle mis en œuvre doit nécessairement rendre compte de l'état d'équilibre hydromécanique modifié par les pressions dues aux stimulations. En effet, l'état d'équilibre initial à partir duquel sera étudié l'effet d'une augmentation de la pression dans le puits sur les écoulements n'est autre que celui obtenu à la fin de la simulation de chacun des essais de stimulations.

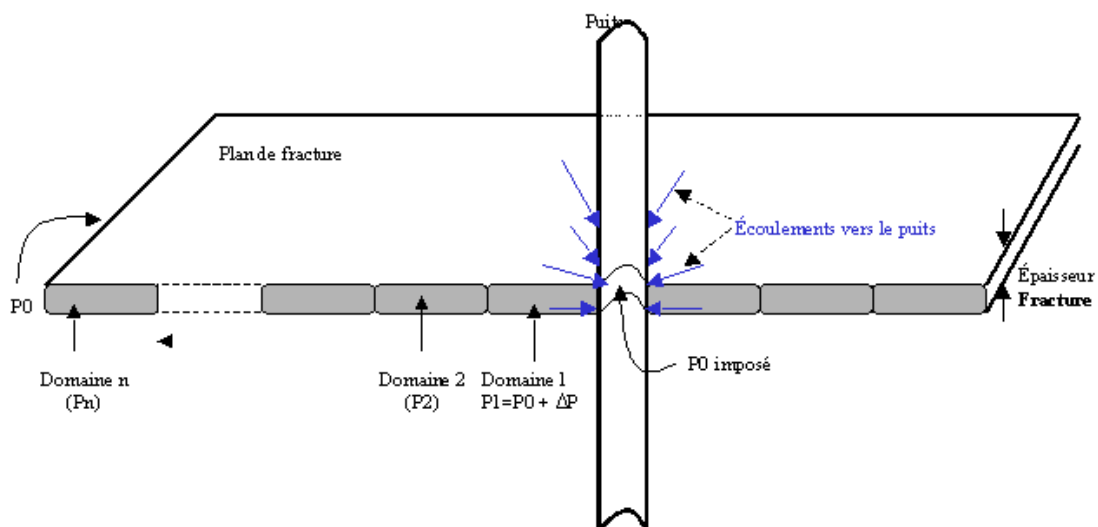
### 3.3.2. Démarche de modélisation

Pour simuler correctement les essais d'injections, la démarche de modélisation la mieux appropriée devrait tenir compte des modifications apportées à l'équilibre naturel par les essais de stimulations. Par conséquent, deux étapes ont été essentielles dans la réalisation des calculs qui vont être présentés ultérieurement :

- tout d'abord, il faudrait rechercher le nouvel état d'équilibre qui correspondrait à l'arrêt des injections des fluides à la fin de l'essai de stimulation ;
- ensuite, la pression appliquée en tête de puits est augmentée en plusieurs paliers successifs. Pendant chaque palier, l'équilibre hydromécanique est établi et les débits injectés sont calculés.

Il est important de savoir que du point de vue numérique, c'est la première étape qui a été la plus délicate à réaliser. En effet, la démarche de calcul la plus naturelle consisterait à rechercher le nouvel état d'équilibre hydromécanique résultant de l'arrêt des injections. Cela s'est traduit en réalité par une annulation des surpressions appliquées en tête de puits à la fin des stimulations. Les parois du puits sont soumises dans ce cas à la seule pression due au poids de la colonne d'eau encore présente.

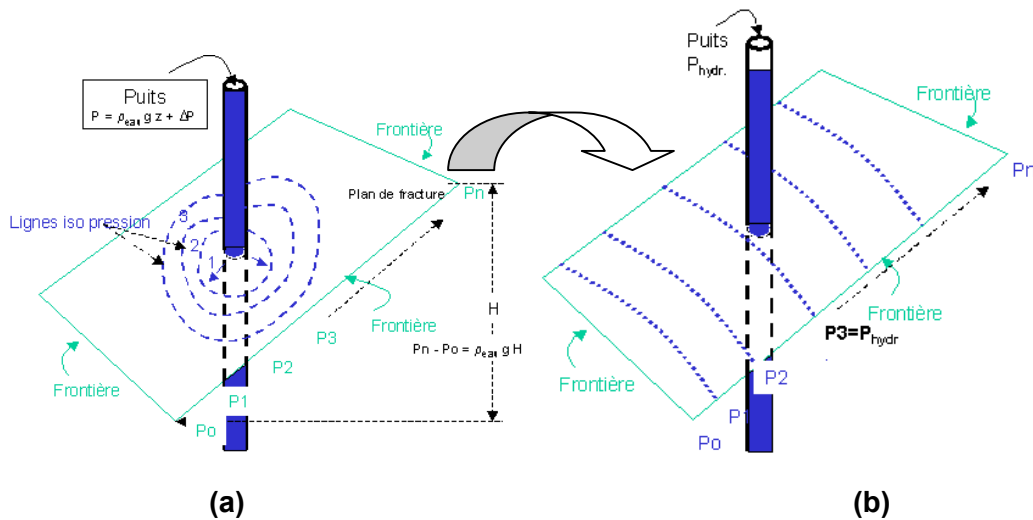
Dans le modèle, l'application d'une pression hydrostatique comme condition le long des parois du puits n'est cependant pas la bonne solution d'un point de vue numérique car les phénomènes simulés dans ce cas ne correspondent pas physiquement à ceux que l'on souhaite étudier (fig. 28). En admettant cette hypothèse, ce sont en effet des écoulements depuis le massif vers le puits qui vont se mettre en place à cause de la différence entre les nouvelles pressions appliquées sur les parois du puits ( $P_0$ ) et celles qui sont mémorisées à la fin de la stimulation dans les domaines proches de ce dernier ( $P_1 > P_0$ ). Par ailleurs, sous l'effet du gradient de pression, l'évacuation des fluides présents dans les fractures se produirait exclusivement par l'intermédiaire du puits, et ceci n'est pas le but recherché.



**Fig. 28 - Schéma des écoulements dans l'hypothèse d'une condition de type pression hydrostatique imposée sur les parois du puits.**

C'est donc l'hypothèse d'un flux nul imposé sur les parois du puits qui a été adoptée par la suite pour simuler l'arrêt des injections. Dans ce cas, le processus qui conduirait à l'équilibre hydromécanique serait initié par une évacuation des fluides à travers les frontières externes du modèle sous l'effet des gradients de pressions existants entre ces dernières et les domaines immédiats du puits.

En première approximation, l'état d'équilibre recherché devrait être caractérisé par un champ de pressions proche d'un état hydrostatique dans les plans de fractures. Par ailleurs, à l'équilibre, les pressions au voisinage du puits doivent être de l'ordre des pressions hydrostatiques pour envisager une simulation correcte des essais d'injections qui ont été réalisés sous de faibles surpressions en tête de puits, généralement de 1 à 2 MPa (fig. 29).



(a) état initial obtenu à la fin de la stimulation ; (b) nouvel état d'équilibre après l'arrêt des injections.

**Fig. 29 - Schéma de l'évolution du champ des pressions dans un plan de fracture après l'arrêt des injections.**

Cependant, cette démarche semble être difficile à mettre en œuvre car l'équilibre est extrêmement long à établir dans le modèle. À titre indicatif, une semaine de calcul sur un ordinateur performant de type Pentium 4 1,8 GHz n'a pas été suffisante pour atteindre l'équilibre.

Le détail de la modélisation numérique de l'essai d'injection réalisé en 1996 dans le forage GPK2 est présenté à l'annexe 9. À cette occasion, les difficultés rencontrées au cours de la modélisation ainsi que les solutions qui ont pu être apportées sont évoquées. Le détail des résultats de la modélisation de l'essai d'injection réalisé en 1994 dans le forage GPK1 est présenté à l'annexe 10.

### 3.3.3. Résultats de la modélisation

Pour atteindre l'équilibre hydromécanique dans des délais de calculs raisonnables, un champ de pressions évoluant vers un état hydrostatique a été imposé au modèle. Techniquement, ce choix revient à substituer aux pressions existantes

dans tous les domaines des plans de fracture des valeurs équivalentes à celles d'un champ hydrostatique. Le modèle réagit dans ce cas en accélérant l'évacuation du surplus de fluide par les frontières jusqu'à ce que les débits sortants soient quasiment nuls.

Pour simuler les essais d'injection, la pression a été augmentée progressivement dans les puits. Quatre paliers de surpressions ont été étudiés dans le cas de GPK2 (tabl. 7) et trois paliers dans le cas de GPK1 (tabl. 8). Pour chaque palier, les débits injectés nécessaires à l'établissement de l'équilibre hydromécanique ont été calculés.

Surpression (MPa)	0,5	1,5	3,5	6,7
Débit (l/s)	6,25	15	25	37,5

**Tabl. 7 - Pressions et débits mesurés pendant l'essai d'injection mené en septembre 1996 dans le forage GPK2.**

Surpression (MPa)	0,5	1,8	3,3
Débit (l/s)	7,3	12,5	18,5

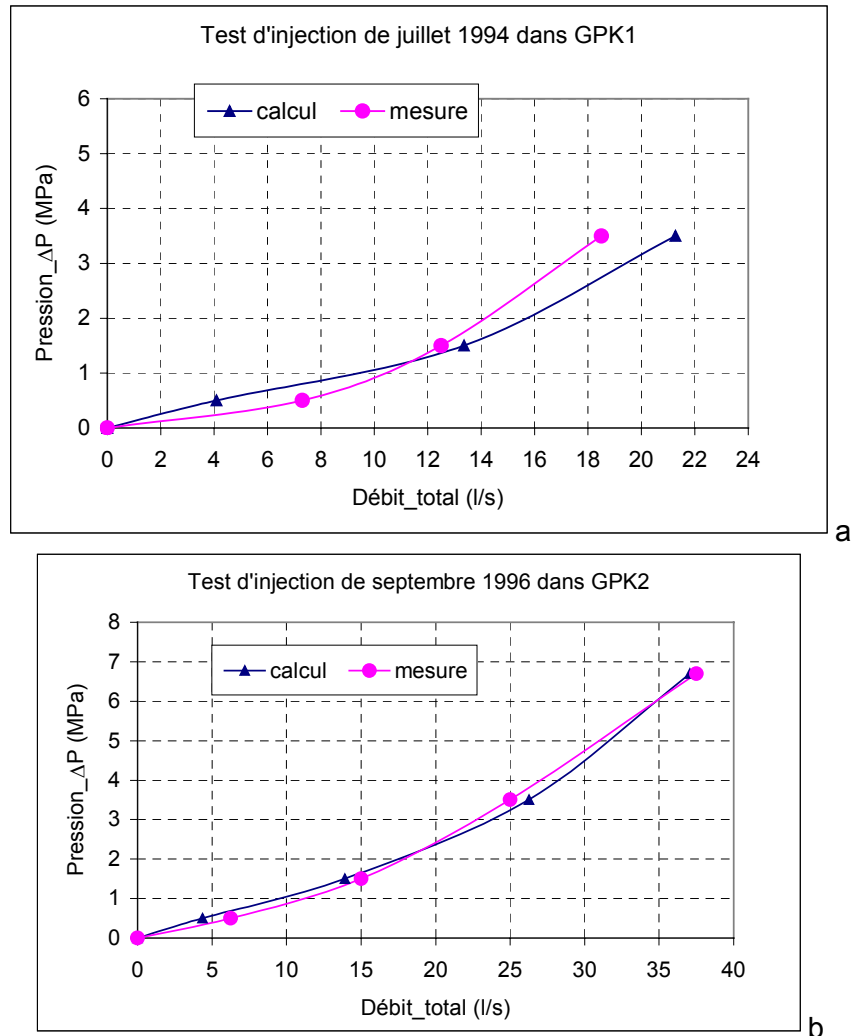
**Tabl. 8 - Pressions et débits mesurés pendant l'essai d'injection mené en juillet 1994 dans le forage GPK1.**

Les résultats des modélisations sont présentés à la figure 30a pour le forage GPK1 et à la figure 30b pour le forage GPK2 (cf. ann. 9 et 10). Il faut souligner les bonnes performances du modèle sur le plan du comportement hydraulique, car les prévisions apportées par les calculs sont cohérentes avec les mesures.

De plus, les déplacements calculés au cours de la simulation des tests d'injection restent très faibles, montrant bien que le problème se réduit en grande partie à un problème hydraulique après la définition de l'état de référence.

Il est important de remarquer que les stimulations antérieures ont bien atteint le but escompté puisque les pressions nécessaires à l'injection de forts débits sont relativement basses dans le cadre des tests d'injection par rapport à ce qu'elles étaient pour les stimulations hydrauliques.

En complément à ces résultats, une analyse fine de la répartition des flux dans les différentes fractures est également possible suite aux essais d'injection. Un exemple en est donné pour GPK1 (ann. 10). Ces résultats pourront être comparés aux flow logs adéquats.



**Fig. 30 - Courbes pression-débit mesurées sur le site et calculées par le modèle lors de la simulation des essais d'injection de juillet 1994 dans le forage GPK1 (a) et de septembre 1996 dans le forage GPK2 (b).**

### 3.4. CONCLUSION

Premièrement, le code de calcul 3DEC-FLO a largement contribué au succès de la démarche de modélisation qui vient d'être mise en œuvre, que ce soit pour l'étude des essais de stimulations ou des essais d'injections post stimulations. Ce succès a été possible grâce aux efforts consentis (**développements scientifiques et informatiques**) pour rendre cet outil capable de simuler le comportement hydromécanique d'un massif rocheux fracturé.

Deuxièmement, la démarche qui s'est inspirée constamment de mécanismes physiques plus ou moins établis, en s'appuyant fréquemment sur **les expérimentations in situ** semble être prometteuse. Les expérimentations ont eu par ailleurs un rôle incontournable dans la conception du modèle et dans le contrôle de ses résultats. Un important travail préliminaire réalisé au début de ce projet, nécessaire au

calibrage des paramètres hydromécaniques du modèle, a été réalisable uniquement grâce aux mesures disponibles. En effet, une forte complémentarité entre le modèle et les mesures a pu être démontrée encore une fois, puisque, les expérimentations ont pu offrir une description du comportement hydromécanique du massif fracturé, sans pour autant fournir les mécanismes physiques qui le régissent. Le modèle, grâce à sa souplesse, a pu remonter aux mécanismes qui peuvent être à l'origine du comportement observé. De plus, pour juger la pertinence des résultats obtenus par le modèle, ce dernier a été mis à l'épreuve selon une démarche prédictive, puis confronté aux comportements réels obtenus par les mesures *in situ* qui ont pu le qualifier.

Ensuite, les points les plus importants qui peuvent être retenus à ce stade du projet sont les suivants :

- les essais de stimulations ont été favorables à une augmentation de la perméabilité du massif rocheux qui a comme origine une augmentation de la perméabilité de certaines fractures préexistantes ;
- une corrélation significative existe entre l'orientation des fractures stimulées et celle des contraintes principales naturelles ;
- le comportement hydraulique mesuré pendant les différents essais de stimulations à Soultz-sous-Forêts semble être lié à la mise en place d'un mécanisme de rupture par cisaillement des fractures. Par ailleurs, l'irréversibilité du mécanisme de cisaillement explique celle de la perméabilité comme cela a été démontré que ce soit au cours des essais d'injections réalisés postérieurement ou par le modèle ;

## 4. Conclusion

**A**près un an de travail dans le cadre de cette convention, la modélisation du comportement thermo-hydro-mécanique du massif rocheux fracturé, en réponse aux stimulations hydrauliques, permet de mieux comprendre les mécanismes mis en œuvre et contribuant à une augmentation irréversible de la perméabilité autour des puits stimulés.

La poursuite des modélisations du comportement thermo-hydro-mécanique au moyen du code PFC<sup>2D</sup> a permis de mieux cerner l'influence des conditions aux limites mécaniques et thermiques et a confirmé le rôle joué par la présence de certains faciès, comme les veines de quartz, sur l'apparition de microfissures dans le proche environnement des zones d'accès à l'échangeur au cours des stimulations hydrauliques.

Les travaux de modélisation réalisés à ce jour au niveau de la 2<sup>e</sup> couronne montrent que moyennant une phase de calage permettant de définir la loi de comportement mécanique la mieux adaptée et le jeu de paramètres associés, il est possible d'espérer modéliser l'effet des stimulations hydrauliques dans les milieux fracturés. En effet, une corrélation significative a été mise en évidence entre l'orientation des fractures stimulées et celle des contraintes principales. La stimulation hydraulique serait plus favorable pour les fractures qui ont une orientation proche de celle de la contrainte principale maximale horizontale. De plus, il semble que l'augmentation brusque de la perméabilité du massif puisse coïncider avec la mise en place des ruptures par cisaillement dans les plans de fracture. Il semblerait alors fort probable que le mécanisme de rupture par cisaillement soit à l'origine du phénomène observé par les mesures. Par ailleurs, ce mécanisme se met en place de façon irréversible, ce qui pourrait également expliquer le comportement irréversible constaté à l'issue des essais. La modélisation des tests d'injection post-stimulations entreprise confirme l'irréversibilité de l'augmentation de la perméabilité en conséquence aux mécanismes de rupture en cisaillement préalablement pris en compte dans la modélisation des stimulations hydrauliques.



## 5. Bibliographie

Gentier S., Hosni A., Genter A., Courrioux G., Rachez X, Billaux D., Riss J., Bruel D. (2003) - Modélisation de l'interface puits-échangeur (site de Soultz-sous-Forêts) : calculs préliminaires, rapport n° BRGM/RP-52658-FR, 220 p.

Gentier S., Genter A., Bourguine B., Chilès J.P., Delpont G., Riss J., Billaux D., Dedecker F., Bruel D. (2002) - Modélisation de l'interface puits-échangeur (site de Soultz-sous-Forêts) : acquisition des données de base et développements préliminaires, rapport n° BRGM/RP-51764-FR, 349 p.

Klee G., Rummel F. (1993) - Hydrofrac Stress Data for the European HDR Research Test Site Soultz-sous-Forêts. *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol. 30, n° 7, 973-976.





## ANNEXE 1

# Analyse quantitative de la texture des faciès des granites cataclasés et bréchifiés

J. Riss (Université Bordeaux I)





### Description des échantillons de gauche à droite sur les images

Forage	N° carotte	N° échant	Prof. (m)	Type d'échant	Faciès	Taille (cm)	Diam (cm)	Description
EPS1	K140	3392	1830.0 1	Demi-carotte	CATA - BREC	12	8	Granite altéré de couleur orange avec début de perte de la texture. Les clastes de FK sont rouge brique. Les plagios sont jaunâtre à orangé et les biotites ont disparues. Présence d'une matrice verte argileuse autour des clastes et de sulfures associés. L'échantillon montre des quartz de taille centimétrique qui pourraient correspondre à une bréchification de veines. Dans la section observée, la texture paraît isotrope.
GPK1	K19	7	1813	Demi-carotte	VEIN+ BREC	11	6.5	Microbrèche rougeâtre. Les clastes identifiables correspondent à des FK (taille inf. au cm) ou à des morceaux de granite très altéré. La matrice brun-rouge à grain très fin cimente les clastes et est formée d'oxyde de Fe, d'argile, de carbonates et de quartz. Présence de fentes et veines de quartz tardives et géodiques.
EPS1	K193	4695	2155.2 8	Demi-carotte	VEIN+HY DR	15	5.5	Transition entre un faciès HYDR et une veine à quartz-sulfures



## **ANNEXE 2**

### **Le logiciel PCF<sup>2D</sup> : rappels**



Le code de calcul PFC<sup>2D</sup> (**P**articles **F**low **C**ode in 2 Dimensions), commercialisé par la société ITASCA, a été utilisé après avoir fait l'objet de développements scientifiques et informatiques pour mieux l'adapter aux besoins de l'étude (Gentier *et al.*, 2002). En effet, ce code bidimensionnel présente les avantages suivants :

- il est actuellement un des rares codes, probablement le seul, à permettre la simulation des phénomènes de micro-fissurations et leurs propagations au sein d'un matériau, grâce à sa structure géométrique particulière constituée de particules circulaires qui interagissent par l'intermédiaire de contacts ;
- il tient compte explicitement de la fracturation existante ;
- il permet, grâce maintenant aux développements qui ont été réalisés, de simuler le comportement thermomécanique en régime transitoire ainsi que l'influence des pressions de fluide qui peuvent exister dans les fractures.

Dans PFC<sup>2D</sup>, la procédure de calcul est basée sur une résolution incrémentale des équations du mouvement (lois de Newton) avec un pas de temps. Le pas de temps est réel lorsqu'on s'intéresse au comportement dynamique du milieu. Cela exige par conséquent la définition de l'amortissement naturel de ce dernier. Le pas de temps est fictif lorsqu'on cherche à établir uniquement l'équilibre quasi statique du milieu. Dans ce cas, un amortissement numérique, sans aucune signification physique, est utilisé pour accélérer la convergence.

D'un point de vue géométrique, les rayons des particules peuvent être constants ou variables obéissant dans ce cas à une loi de distribution statistique ou issus d'une combinaison des deux.

D'un point de vue mécanique, les particules ont une densité et interagissent par l'intermédiaire de points de contacts qui sont définis par leurs raideurs normale et tangentielle, un coefficient de frottement et une cohésion microscopique.

Les lois qui régissent ces contacts obéissent à trois types de modèles de comportement :

- modèle rigide : il permet de définir une relation élastique, linéaire ou non, entre la force de contact et le déplacement relatif entre deux particules ;
- modèle de glissement : il permet de définir une relation entre les forces de contact normales et tangentielles en fixant une limite à la force tangentielle ;
- modèle cohésif : il permet de définir un seuil de rupture pour les forces normales et tangentielles dans le cas des liaisons cimentées.

Les deux premiers modèles s'appliquent pour les liaisons dites non cimentées.

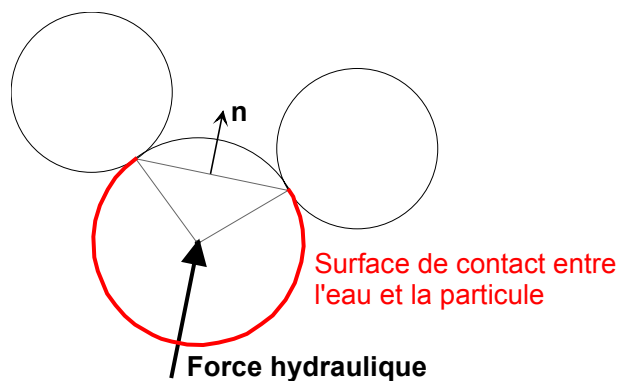
D'un point de vue thermique, l'échange calorifique entre les particules, considérées dans ce cas comme des réservoirs de chaleur, s'effectue à travers des conduites représentées par les liaisons cimentées. L'échange thermique disparaît dès que le contact entre les deux particules est rompu.

Enfin, les frontières du modèle dans PFC<sup>2D</sup> sont représentées par des parois qui sont définies aux contacts des particules par leurs propres raideurs (normale et tangentielle) et angles de frottement.

Les principales étapes de la génération du modèle PFC sont les suivantes :

- génération du massif rocheux non fracturé qui se décompose en plusieurs étapes ;
- génération des murs (limites géométriques du modèle : taille du modèle) et des particules (définition des zones correspondant aux faciès) ;
- application d'un état de contrainte isotrope correspondant à la contrainte minimale par augmentation ou diminution des rayons des particules ;
- élimination des particules isolées par augmentation du rayon des particules pour augmenter les contacts ;
- application d'une contrainte anisotrope en déplaçant les parois verticales et horizontales du modèle pour conserver les contacts entre les particules ;
- application des propriétés mécaniques et thermiques ;
- génération de la fracture par suppression d'un certain nombre de particules se trouvant sur le trajet virtuel de la fracture en fonction de l'ouverture maximale voulue et de la proportion recherchée de contacts entre les épontes ;
- application des conditions aux limites mécaniques. Elles peuvent être de deux types : en vitesse de déplacement ou en contrainte initiale constante sur la paroi ;
- application des conditions aux limites thermiques. Elles peuvent être de trois types : limite adiabatique, température imposée et flux imposé ;
- application des sollicitations hydrauliques et thermiques.

La sollicitation mécanique, liée à la pression hydraulique appliquée, est modélisée par l'application sur l'ensemble des particules constituant les épontes d'une force (fig. 1) dont la direction, le sens et la norme sont fonction de la pression hydraulique et de la distance entre les deux points de contact encadrant la particule considérée (surface de contact entre le fluide et la particule). Le temps de montée en pression et le nombre de paliers de mise en pression sont des données d'entrée.



**Fig. 1 - Modélisation de la pression hydraulique sous PFC<sup>2D</sup>.**

D'un point de vue thermique, chaque particule est assimilée à un réservoir de chaleur et les liaisons cimentées entre particules sont considérées comme des conduites

permettant les transferts de chaleur entre les deux particules en contact. Le cycle thermique alterne entre :

- le calcul de l'écoulement de chaleur entre deux particules liées par une liaison cimentée ;
- le calcul de la variation de température de chaque particule.

Pour une modélisation couplée, l'état de contrainte hydraulique est appliqué en premier, la pression hydraulique s'applique quasi-instantanément, alors que la propagation du flux de chaleur au sein du massif demande un temps beaucoup plus long. Une fois le palier de pression atteint, le couplage thermo-hydro-mécanique est activé. Le principe du couplage réside dans un va-et-vient régulier entre des cycles thermiques et des cycles mécaniques de rééquilibrage de la structure granulaire. Cette phase est beaucoup plus longue que la précédente (application de la pression hydraulique), car la propagation de la chaleur au sein du massif nécessite plus de temps. Le premier est de l'ordre du dixième de seconde, tandis que le second est appliqué pendant plusieurs heures.

Le détail de la démarche appliquée dans le cadre de ces travaux est présentée en détail dans le rapport d'Itasca (Dedecker, 2002) et un descriptif du code est donné dans Itasca (1995).

Dedecker F. (2002) - Projet Soultz : définition des paramètres et génération du modèle numérique. Rapport Itasca 02-003b, 48 p.

Gentier S., Genter A., Bourguine B., Chilès J.P., Delpont G., Riss J., Billaux D., Dedecker F., Bruel D. (2002) - Modélisation de l'interface puits-échangeur (site de Soultz-sous-Forêts) : acquisition des données de base et développements préliminaires, rapport n° BRGM/RP-51764-FR, 349 p.

ITASCA (1995) - *PFC<sup>2D</sup>, Particle Flow Code in 2 Dimensions*. User's Manual. Itasca Consulting Group, Minneapolis, MN.



## **ANNEXE 3**

# **Comportement THM des zones d'accès à l'échangeur**

A. Hosni, S. Gentier (CDG/ENE)



## 1. Rappel

Les travaux réalisés pendant la phase précédente de ce programme de recherche, dédié en partie à l'étude du comportement Thermo-Hydro-Mécanique (THM) de la première couronne à l'aide du code de calcul PFC<sup>2D</sup>, se sont concrétisés par une avancée significative dans la compréhension des phénomènes mis en jeu (cf. Gentier *et al.*, 2002). Ils ont également contribué de manière fondamentale à la mise au point des conditions optimales du modèle qui garantiraient une meilleure analyse physique des mécanismes mis en place.

Il est apparu alors souhaitable de :

- augmenter la largeur du modèle afin de minimiser l'influence des conditions aux limites. Dans la présente étude, le modèle retenu est un carré de côté égale à 0,70 m, soit un modèle dans lequel la largeur a été multipliée par deux par rapport à celui de la phase précédente ;
- analyser le comportement THM uniquement pour une durée de sollicitations thermiques pendant laquelle la diminution de la température des particules proches des frontières du modèle est encore faible afin d'écartier les effets mécaniques liés simplement aux conditions aux limites imposées. L'évaluation de la durée pendant laquelle l'analyse des phénomènes mis en jeu est fiable dépend naturellement de la taille du modèle.

Ces deux remarques vont être prises en compte dans l'étude du comportement THM des principales zones d'accès identifiées dans le forage GPK1.

Les tableaux 1, 2, 3, 4 et 5 rappellent les principaux paramètres mis en œuvre dans le modèle. Le tableau 1 ci-dessous, établi au cours des travaux antérieurs, rappelle le pourcentage des phases minérales présentes dans du granite hydrothermalisé (HYDR) provenant de Soultz-sous-Forêts qui se caractérise principalement par l'illitisation des feldspaths plagioclases (transformations en minéraux argileux).

Faciès	Feldspaths potassiques	Feldspaths plagioclases	Minéraux noirs	Quartz
HYDR1	22 %	39 %	7 %	32 %

**Tabl. 1 - Composition en pourcentage d'aire des quatre principales phases minérales du faciès hydrothermalisé (HYDR).**

Le tableau 2 ci-dessous rappelle la synthèse de l'analyse granulométrique retenue dans PFC<sup>2D</sup> pour les différentes phases minérales.

	Quartz	Minéraux noirs	Feldspaths plagioclases	Feldspaths potassiques
Rayons minimum (mm)	1,5	1	2	3
Rayons maximum (mm)	3,5	2	6	12
Rayon moyen (mm)	2,5	1,5	4	7,5

**Tabl. 2 - Rayons minimums, maximums et moyens retenus dans le code PFC<sup>2D</sup> pour la simulation des quatre principales phases minérales (Gentier *et al.*, 2002).**

Les tableaux 3 et 4 ci-dessous, extraits du rapport BRGM/RP-51764-FR, synthétisent respectivement les propriétés mécaniques et thermiques qui ont été prises en compte dans le code PFC<sup>2D</sup> pour chacune des quatre phases minérales.

	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Module d'Young (MPa)	Coefficient de Poisson	Résistance à la compression (MPa)
Quartz	2 653	57 900	0,08	207
Minéraux noirs	3 051	62 185	0,21	200
Feldspaths potassiques	2 560	38 445	0,28	173
Feldspaths Plagioclases illitisés*	2 329	14 012	0,28	112

\* on pose l'hypothèse que 100 % des feldspaths plagioclases sont illitisés. Les valeurs des propriétés attribuées sont celles de minéraux argileux.

**Tabl. 3 - Propriétés mécaniques des quatre principales phases minérales (Gentier et al., 2002).**

	Conductivité thermique (W / m °C)	Coeff. de dilatation thermique linéaire (°C)	Capacité thermique massique (J/kg/°K)
Quartz	5,200	3,5 10 <sup>-5</sup>	700
Minéraux noirs	1,976	1,4 10 <sup>-5</sup>	700
Feldspaths Potassiques	1,612	0,385 10 <sup>-5</sup>	679
Feldspaths Plagioclases illitisés*	1,612	1,4 10 <sup>-5</sup>	707

\* on pose l'hypothèse que 100 % des feldspaths plagioclases sont illitisés. Les valeurs des propriétés attribuées sont celles de minéraux argileux.

**Tabl. 4 - Propriétés thermiques des quatre principales phases minérales (Gentier et al., 2002).**

Le tableau 5 ci-dessous rappelle les paramètres élastoplastiques établis antérieurement lors de la procédure de calage du comportement mécanique global des faciès HYDR et VEIN à partir des paramètres mécaniques propres à chacune des phases minérales (Gentier et al., 2002).

	Paramètres élastiques	Paramètres à la rupture (critère de Mohr-Coulomb)
HYDR1	E = 33500 MPa ν = 0,26	φ = 37,5° C = 35,8 MPa
VEIN_QUARTZ	E = 56700 MPa ν = 0,1	φ = 40,2° C = 47,7 MPa

**Tabl. 5 - Propriétés mécaniques des faciès HYDR et VEIN obtenues à l'issue de la procédure de calage dans PFC2D.**

Le comportement THM du modèle sera étudié en fonction :

- des types de faciès qui entourent la fracture ;
- des conditions initiales thermique et mécanique ;
- des conditions aux limites thermique et mécanique ;

L'analyse des résultats portera sur les points suivants :

- l'apparition de micro-ruptures : terme désignant la rupture du point de contact entre deux particules adjacentes ;
- les forces de contacts qui s'exercent au niveau des liaisons entre les particules ;
- l'évolution des températures des particules en fonction du temps ;
- les déplacements.

Les calculs vont être menés suivant la procédure rappelée ci-dessous :

- étape 0 : établissement de l'état d'équilibre de référence à partir des conditions THM initiales et aux limites ;
- étape 1 : établissement du nouvel état d'équilibre induit par l'application du premier palier de pression dans la fracture ;
- étape 2 : recherche du nouvel état d'équilibre thermomécanique induit par l'application d'une température constante égale à 20 °C sur les deux épontes de la fracture pour une durée déterminée (1 à 6 h), la pression étant maintenue constante ;
- étape i : établissement du nouvel état d'équilibre induit par l'application du i<sup>e</sup> palier de pression dans la fracture ;
- étape i+1 : recherche du nouvel état d'équilibre thermomécanique induit par l'application d'une température constante égale à 20 °C sur les deux épontes de la fracture, la pression étant maintenue constante.

**N.B. :** Pour tous les calculs qui vont être présentés, les contraintes principales mesurées sur le site de Soultz-sous-Forêts, dont un rappel est donné ci-dessous, vont être appliquées comme conditions initiales (Klee et Rummel, 1993) :

Ces auteurs ont pu établir les contraintes principales pour une profondeur (z) comprise entre 1 458 et 3 500 m :

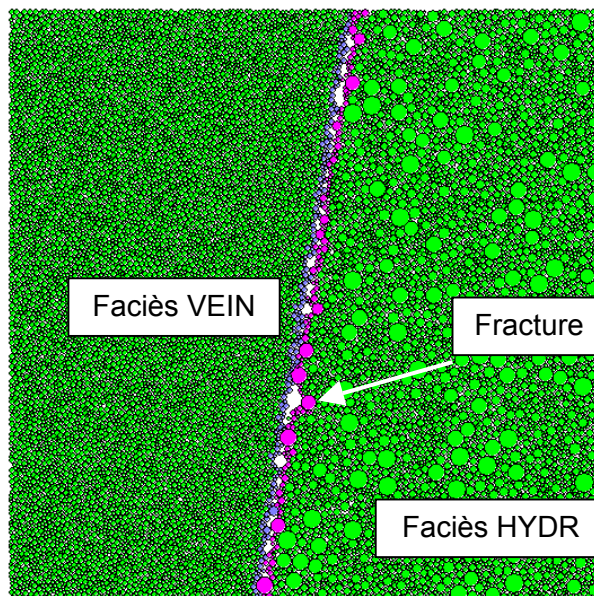
$$\begin{aligned}\sigma_h &= 15,8 + 0,0149 (z-1458) \\ \sigma_H &= 23,7 + 0,0336 (z-1458) \quad [\text{en MPa}] \\ \sigma_v &= 33,8 + 0,0255 (z-1377)\end{aligned}\quad (1)$$

dans lesquelles,  $\sigma_h$  (resp.  $\sigma_H$ ) est la contrainte principale horizontale mineure (resp. majeure),  $\sigma_v$  la contrainte principale verticale et z la profondeur. D'après ces auteurs, la contrainte majeure ( $\sigma_H$ ) est orientée à 170 °E par rapport au nord.

## 2. Modélisation de la zone 2 de GPK1

### 2.1. PRÉSENTATION DU MODÈLE

Les modèles qui vont être étudiés dans ce paragraphe concernent la zone d'accès numéro 2 du forage GPK1. La fracture étudiée est localisée à environ 3 221 m de profondeur au sein d'un faciès granitique altéré, composé principalement d'un granite hydrothermalisé (HYDR) au voisinage de la première éponte et d'une veine de quartz (VEIN) au voisinage de la seconde (fig. 1). Le pendage et la direction de pendage qui ont été mesurés pour cette fracture sont respectivement égale à 81° et 42°N.



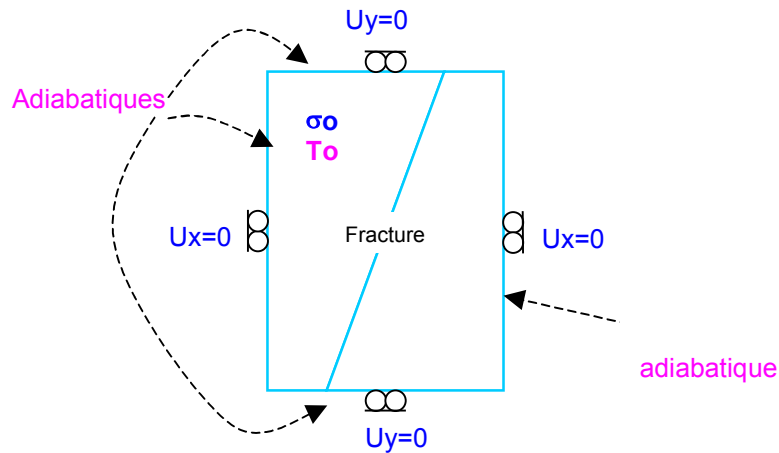
**Fig. 1 - Géométrie du modèle obtenue pour la fracture perméable de la zone 2 de GPK1.**

Les contraintes initiales mesurées au voisinage de cette fracture sont les suivantes, en adoptant un signe négatif pour les compressions :

$$\begin{aligned} \sigma_h &\cong -42 \text{ MPa} \\ \sigma_H &\cong -83 \text{ MPa} \\ \sigma_v &\cong -81 \text{ MPa} \end{aligned} \quad [\text{Conditions initiales mécaniques}]$$

Toutes les particules du modèle ont une même température initiale ( $T_0$ ) égale à 150 °C. Des déplacements nuls sont imposés perpendiculairement à chacune des parois (fig. 2). Des limites adiabatiques sont imposées sur toutes les parois (fig. 2). Six paliers de pressions hydrauliques sont appliqués progressivement dans la fracture :

41 MPa, 42 MPa, 42,5 MPa, 43 MPa, 43,5 MPa, 44,2 MPa,

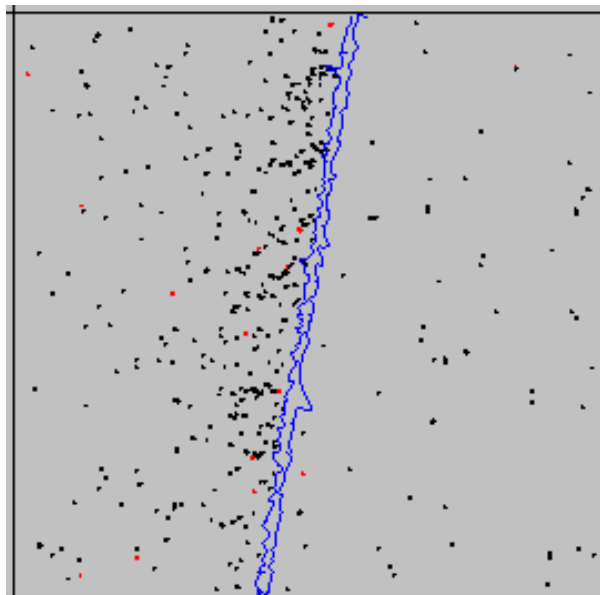


**Fig. 2 - Conditions initiales et aux limites appliquées au modèle de référence.**

## 2.2. Résultats

Les principaux résultats obtenus à l'issue de la mise en œuvre du scénario décrit ci-dessus sont présentés dans ce qui suit.

Dès la première heure de refroidissement des épontes, de nombreuses micro-ruptures font leur apparition principalement dans le faciès de quartz (fig. 3).



**Fig. 3 - Répartition des ruptures dans le modèle de référence après 1 heure (rouge : rupture en compression ; noir : rupture en traction).**

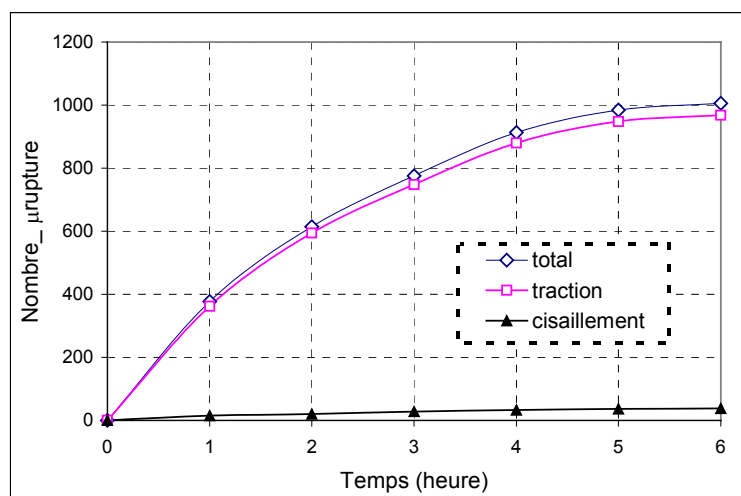
Pendant la première heure de sollicitation thermique, le pourcentage de contacts rompus entre les particules du faciès VEIN est largement supérieur à celui obtenu pour le faciès HYDR, soit 1,5 % contre 0,36 % (tabl. 14). Par ailleurs, ce même tableau montre que cet écart se creuse d'avantage avec la durée des sollicitations thermiques

atteignant au bout de six heures près de 4,25 % dans le faciès VEIN pour seulement 0,58 % dans le faciès HYDR. Au regard du nombre total de micro-ruptures, ce dernier évolue nettement vite au moment du choc thermique où l'essentiel des micro-ruptures se localise à proximité des épontes, puis il accroît plus lentement à l'issue des quatre premières heures (fig. 4). Cette figure montre également que l'immense majorité des micro-ruptures se met en place par un mécanisme en traction, et que très peu ont pour origine un mécanisme en cisaillement.

La dominance du mécanisme de rupture par traction des contacts entre particules est favorisée par les déformations par contractions de ces dernières suite à une diminution de leurs températures. Les particules de quartz sont favorables à ce type de déformations, en comparaison à celles du granite hydrothermalisé, à cause de leurs faibles propriétés thermiques. En effet, l'hétérogénéité des minéraux présents dans le faciès hydrothermalisé lui confère des propriétés thermiques équivalentes (conductivité et coefficient d'expansion) relativement plus faibles que celles du quartz seul. Par conséquent, les transferts de chaleur du quartz vers l'éponte sont plus importants, induisant ainsi des contractions thermiques plus importantes pour les particules de quartz (contraction des particules).

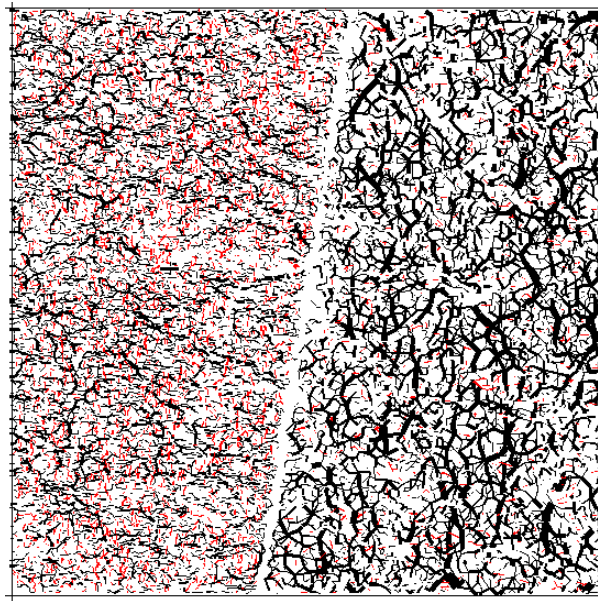
% de micro-ruptures	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h
VEIN	1,5	2,5	3,24	3,85	4,16	4,25
HYDR	0,36	0,46	0,5	0,54	0,57	0,58
Total	1,03	1,68	2,12	2,49	2,69	2,75

**Tabl. 6 - Pourcentage de ruptures dans les différents faciès en fonction du temps (conditions limites en déplacements).**



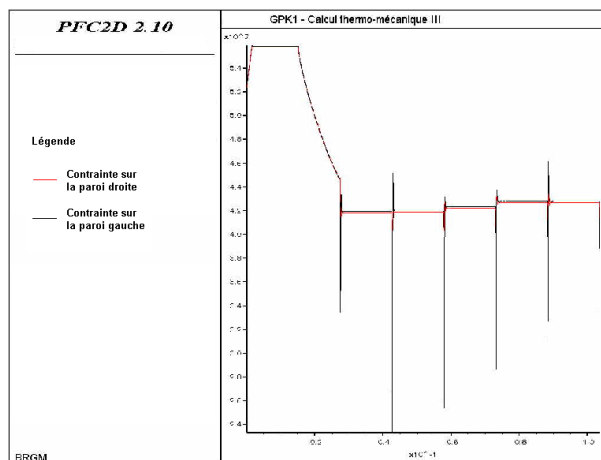
**Fig. 4 - Évolution en fonction du temps du nombre de micro-ruptures dans le modèle.**

Les efforts de tractions (lignes rouges) développés au niveau des liaisons entre particules sont nettement plus présents dans le faciès de quartz en comparaison avec le faciès hydrothermalisé où les compressions (lignes noires) sont dominantes (fig. 5). Le confinement des épontes dû à la pression exercée par les fluides n'a pas été suffisant pour atténuer l'effet du refroidissement qui est à l'origine des forces en tractions.



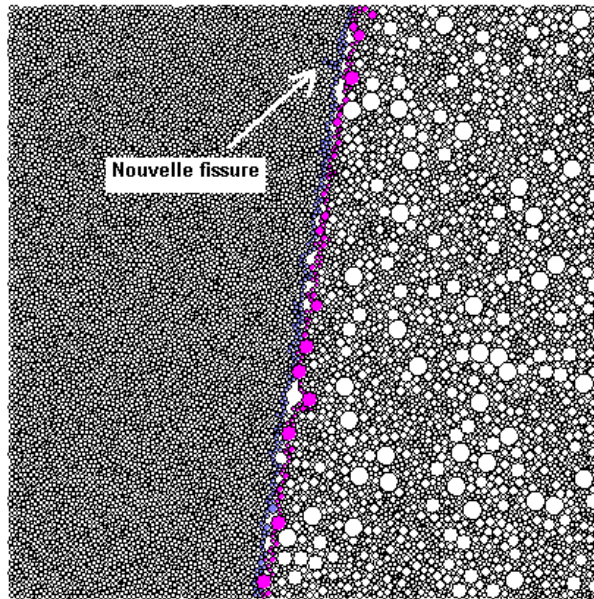
**Fig. 5 - Répartition des forces de contacts entre les particules après 6 h (rouge : force de traction ; noir : force de compression).**

L'évolution de la contrainte horizontale moyenne qui s'exerce sur les deux parois verticales pendant les six premières heures montre un relâchement notable des contraintes au moment du choc thermique (fig. 6). Ces dernières chutent de près de 25 %, passant de 56 MPa à 42 MPa au cours de la première heure, laissant la place ensuite à une légère augmentation provoquée principalement par l'augmentation de la pression dans la fracture.



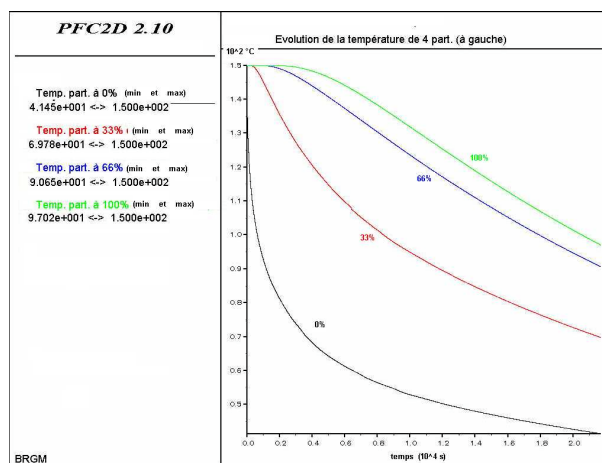
**Fig. 6 - Évolution de la contrainte horizontale moyenne.**

Un phénomène de coalescence des micro-ruptures se met en place aboutissant au final à la formation d'une nouvelle fissure qui se propage depuis l'éponte vers l'intérieur du faciès de quartz après seulement une sollicitation thermique d'une heure (fig. 7). Ce phénomène pourrait probablement expliquer l'augmentation de la porosité locale mesurée par des méthodes géophysiques à proximité de cette zone d'accès.

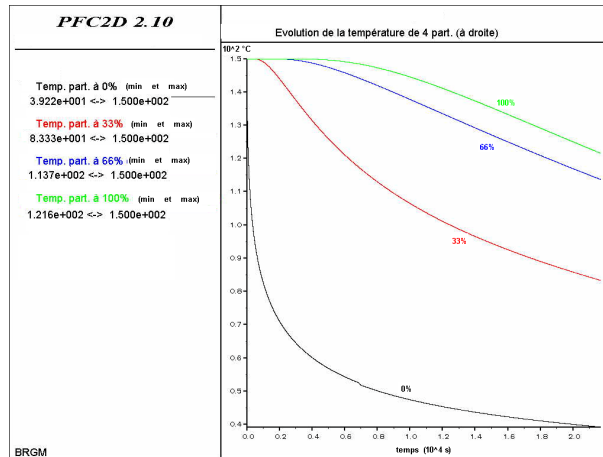


**Fig. 5 - Initiation d'une nouvelle fissure à partir de l'éponte après 1 heure.**

L'évolution des températures suivie pour quatre particules placées sur une ligne horizontale passant par le centre de gravité du modèle et localisées à des distances de 0 %, 33 %, 66 % et 100 % de ce dernier dans chacun des deux faciès montre une diminution de la température pour les particules les plus éloignées de près de 35 % dans le quartz pour seulement 19 % dans le granite hydrothermalisé au bout de six heures (fig. 8 et 9).



**Fig. 8 - Évolution des températures pour les quatre particules du faciès de quartz.**



**Fig. 9 - Évolution des températures pour les quatre particules du faciès de granite hydrothermalisé.**

Ces premiers résultats du modèle, qui par ailleurs confortent ceux obtenus dans l'étude précédente, ont montré :

- une sensibilité accrue du faciès composé exclusivement de particules en quartz face aux sollicitations d'origine thermique qui semblent être à l'origine de la recrudescence des micro-ruptures dans sa texture initiale en comparaison au granite hydrothermalisé ;
- la possibilité de développement d'une fissuration nouvelle par un phénomène de coalescence des micro-ruptures qui pourrait par ailleurs expliquer l'augmentation de la porosité locale dans cette zone.

Cependant, une certaine prudence s'impose quant à l'interprétation des résultats obtenus pour une durée de simulation thermique *a priori* supérieure à une heure. En effet, la température des particules proches des frontières externes du modèle enregistre une baisse peu significative pendant la première heure, soit moins de 3 % de chute pour les particules situées à plus des deux tiers de distance de la fracture (fig. 8 et 9). Au-delà de cette durée, les baisses de températures commencent à devenir significatives et l'analyse des phénomènes peut être influencée par les conditions aux limites mécaniques. En d'autres termes, les micro-ruptures qui se mettent en place par un mécanisme en traction pourraient être partiellement dues aux conditions en déplacements nuls qui sont imposées.

### 2.3. ÉTUDE DE QUELQUES VARIANTES DU MODÈLE

Pour conforter d'avantage l'analyse par le modèle des phénomènes mis en jeu au cours des sollicitations thermiques, des calculs supplémentaires ont été réalisés pour évaluer le comportement simulé sous les hypothèses de travail suivantes :

- conditions de flux imposées aux limites du modèle : du point de vue physique, ce type d'hypothèse, qui représente une arrivée de flux de chaleur vers les zones de refroidissement, est plus proche de la réalité. Du point de vue numérique, il nécessite des temps de calculs relativement plus longs. La mise en œuvre de ce type d'hypothèse dans le cas présent est indispensable pour évaluer les éventuels écarts par rapport à une solution de type adiabatique. Dans

l'hypothèse où l'écart entre les deux solutions est minime, il devient plus intéressant, en terme de temps des calculs, de travailler avec une hypothèse de type adiabatique ;

- conditions de type contraintes aux limites du modèle : cela revient à supposer l'existence, au-delà des frontières, d'un milieu doté d'une certaine élasticité qui lui permet de compenser les déformations volumiques enregistrées par le modèle ;
- une température plus élevée pour le fluide : il s'agit dans ce cas d'étudier le comportement THM pour une température du fluide supposée égale à 70 °C au lieu de 20 °C. Cette hypothèse permet d'évaluer le comportement THM de la fracture à des endroits supposés assez loin de la zone d'injection, où le fluide est supposé avoir échangé de la chaleur avec le massif rocheux.

### 2.3.1. Résultats pour un flux de chaleur imposé

Un flux de chaleur égale à 133,5 mW/m<sup>2</sup> a été imposé aux frontières du modèle en association avec des conditions de type déplacement nul imposé.

Le tableau ci-dessous résume le pourcentage des micro-ruptures apparues dans les deux faciès VEIN et HYDR pendant les premières heures de sollicitation thermique (tabl. 7).

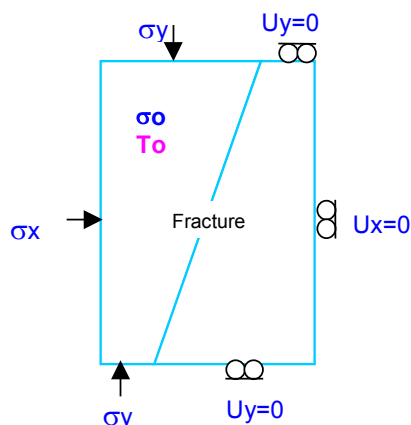
Les résultats sont, à un centième près, identiques à ceux obtenus dans l'hypothèse d'une condition de type adiabatique. Aucune différence notable n'a pu être observée à l'issue des calculs qui ont été menés dans les deux hypothèses. Par conséquent, peu d'importance sera accordée par la suite au type de conditions aux limites thermiques qui vont être appliquées dans le modèle.

% de micro ruptures	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h
VEIN	1,49	2,49	3,17	3,71	4,08	4,12
HYDR	0,36	0,45	0,50	0,53	0,56	0,57
Total	1,03	1,65	2,07	2,40	2,63	2,67

**Tabl. 7 - Pourcentage de ruptures dans les différents faciès en fonction du temps (conditions limites flux + déplacements).**

### 2.3.2. Résultats pour des contraintes imposées

Des contraintes ont été imposées sur toutes les frontières externes du faciès de quartz, en maintenant des déplacements nuls sur le reste (fig. 10).



**Fig. 10 - Conditions initiales et aux limites de type contraintes appliquées au modèle.**

Ce type d'hypothèse a abouti manifestement à un comportement complètement différent pour le modèle.

En effet, les micro-ruptures sont nettement moins nombreuses dans les deux faciès VEIN et HYDR (tabl. 8).

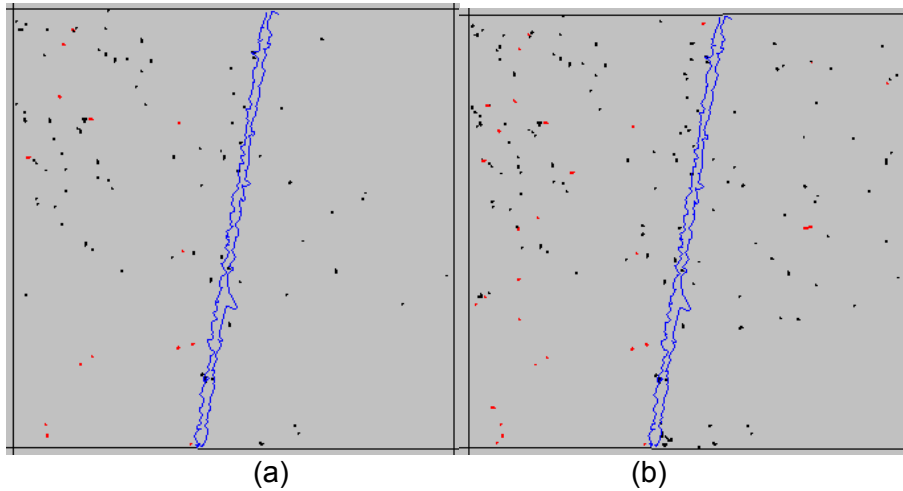
En moyenne, elles sont dix fois moins nombreuses par rapport au cas de figure traité précédemment (tabl. 6).

Dans la configuration actuelle, les contractions d'origine thermique des particules, qui induisent des efforts en tractions au niveau des liaisons interparticulaires, sont compensées par des déformations au niveau des parois externes du modèle nécessaires au maintien des contraintes imposées.

% de micro ruptures	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h
VEIN	0,26	0,38	0,41	0,42	0,42	0,42
HYDR	0,03	0,13	0,18	0,22	0,23	0,29
Total	0,16	0,27	0,32	0,34	0,34	0,37

**Tabl. 8 - Pourcentage de ruptures dans les différents faciès en fonction du temps (conditions limites adiabatiques + contraintes).**

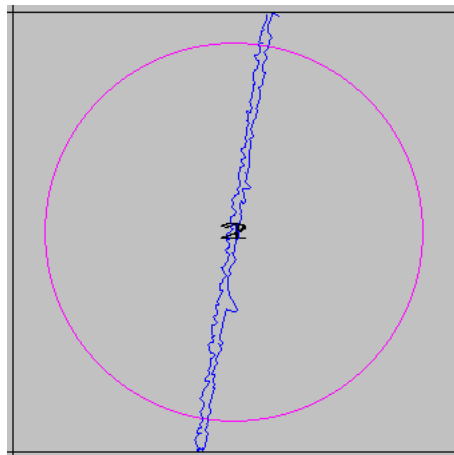
En relatif, le faciès de quartz demeure cependant le lieu où apparaissent d'avantage les micro-ruptures (fig. 11).



**Fig. 11 - Répartition des ruptures dans le modèle après a) 1 heure et b) 6 heures (rouge : rupture en compression ; noir : rupture en traction).**

La différence de comportement obtenue entre les deux types de conditions aux limites appliquées dans le modèle s'explique par l'état des contraintes auquel sont soumis les particules. En effet, les contraintes moyennes estimées sont largement supérieures à celles qui sont calculées avec des conditions aux limites de type déplacement. Ainsi, au bout d'une heure de sollicitation thermique, les contraintes moyennes calculées dans le cas présent sont de - 45,5 MPa pour  $\sigma_{xx}$ , - 103 MPa pour  $\sigma_{yy}$  et 4,7 MPa pour  $\tau_{xy}$  ; alors que ces dernières sont respectivement égales à - 37 MPa, - 50 MPa et 6,6 MPa pour des conditions de type déplacement.

N.B. : Les contraintes moyennes sont calculées à l'intérieur du cercle de rayon égale à 30 cm tracé dans le modèle (fig. 12).



**Fig. 12 - Cercle de calcul des contraintes moyennes dans le modèle.**

Un commentaire concernant les conditions aux limites mécaniques semble être nécessaire à ce stade, car en principe ces dernières doivent être placées de manière à ne pas influencer localement le comportement THM du modèle. Mais, il apparaît ici que la prise en compte d'une condition de type contraintes imposées sur les frontières du modèle influence ce comportement dès le début des sollicitations thermiques. Pour diminuer l'effet des

conditions aux limites de type contraintes sur le comportement THM simulé, il serait donc souhaitable d'augmenter les dimensions du modèle.

### 2.3.3. Résultats pour un fluide de température initiale 70 °C

Dans ces calculs, les principales hypothèses sont rappelées ci-dessous :

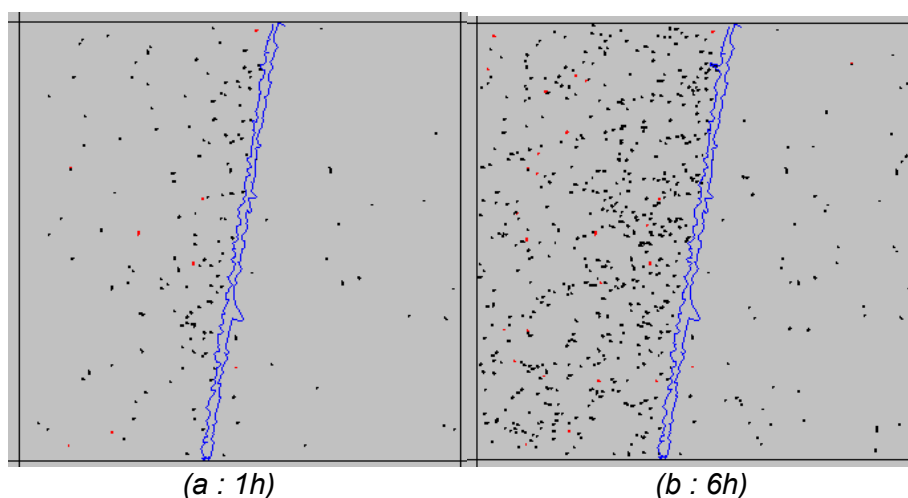
- conditions aux limites : {adiabatique + déplacement nul} ;
- conditions initiales : une température égale à 150 °C partout ;
- sollicitation thermique : une température du fluide égale à 70 °C.

Les micro-ruptures sont en moyenne presque deux fois moins nombreuses dans les deux faciès VEIN et HYDR lorsque la température du fluide passe de 20 °C à 70 °C (tabl. 9). La réduction des écarts de température entre le fluide et la roche provoque des contractions d'origine thermique des particules qui sont de moindre ampleur.

% de micro ruptures	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h
VEIN	0,63	1,14	1,52	1,9	2,22	2,26
HYDR	0,17	0,37	0,43	0,44	0,44	0,44
Total	0,44	0,82	1,07	1,30	1,49	1,70

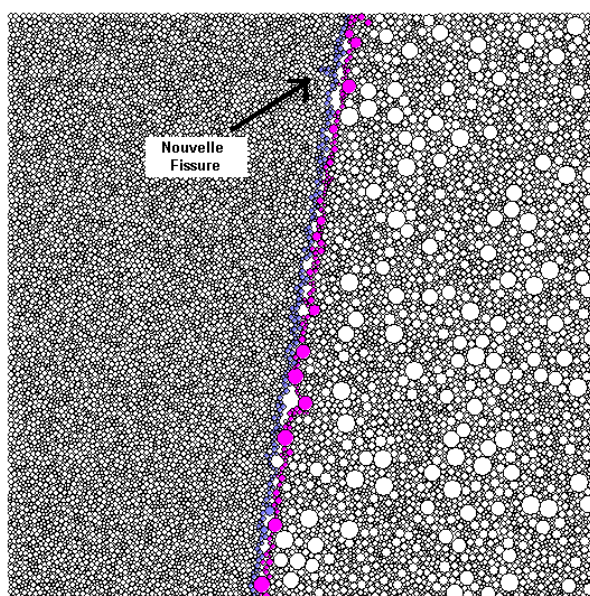
**Tabl. 9 - Pourcentage de ruptures dans les différents faciès en fonction du temps (conditions limites en déplacements).**

Le faciès de quartz présente là encore le plus grand nombre de micro-ruptures, soit cinq fois plus que dans le faciès hydrothermalisé (fig. 13).



**Fig. 13 - Répartition des ruptures dans le modèle dans l'hypothèse d'un fluide de température initiale égale à 70 °C après a) 1 heure et b) 6 heures (rouge : rupture en compression ; noir : rupture en traction).**

La formation d'une nouvelle fissure se propageant depuis l'éponte vers l'intérieur du faciès de quartz par un phénomène de coalescence des micro-ruptures se met en place de manière nettement visible après cinq heures de sollicitation thermique (fig. 14).



**Fig. 14 - Initiation d'une nouvelle fissure à partir de l'éponte après 5 heures.**

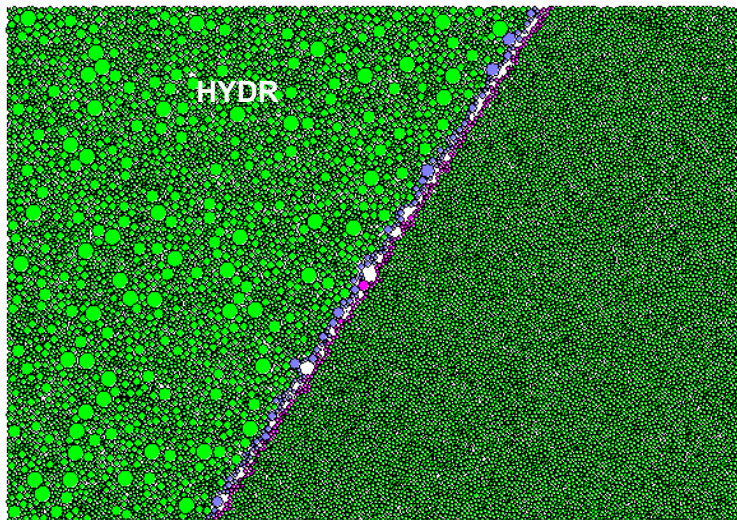
### 3. Modélisation de la zone 3 de GPK1

Ce paragraphe est consacré à la modélisation de la zone d'accès numéro 3 du forage GPK1.

La fracture étudiée est localisée à environ 3 489,5 m de profondeur au sein d'un faciès granitique altéré, composé principalement d'un granite hydrothermalisé (HYDR) au voisinage de la première éponte et d'une veine de quartz (VEIN) au voisinage de la seconde (fig. 15).

Le pendage et la direction de pendage qui ont été mesurés pour cette fracture sont respectivement égale à 57° et 246 °N.

Le pendage relativement faible de la fracture (57° au lieu de 81°) a nécessité une légère augmentation de la dimension latérale du modèle jusqu'à 1 m afin de laisser une distance raisonnable entre les frontières et la zone sollicitée représentée ici par la fracture.



**Fig. 15 - Géométrie du modèle obtenue pour la fracture perméable de la zone 3 de GPK1.**

Les contraintes initiales mesurées au voisinage de cette fracture sont les suivantes, en adoptant un signe négatif pour les compressions :

$$\begin{aligned} \sigma_h &\cong -46 \text{ MPa} \\ \sigma_H &\cong -92 \text{ MPa} \\ \sigma_v &\cong -87 \text{ MPa} \end{aligned} \quad \text{[Conditions initiales mécaniques]}$$

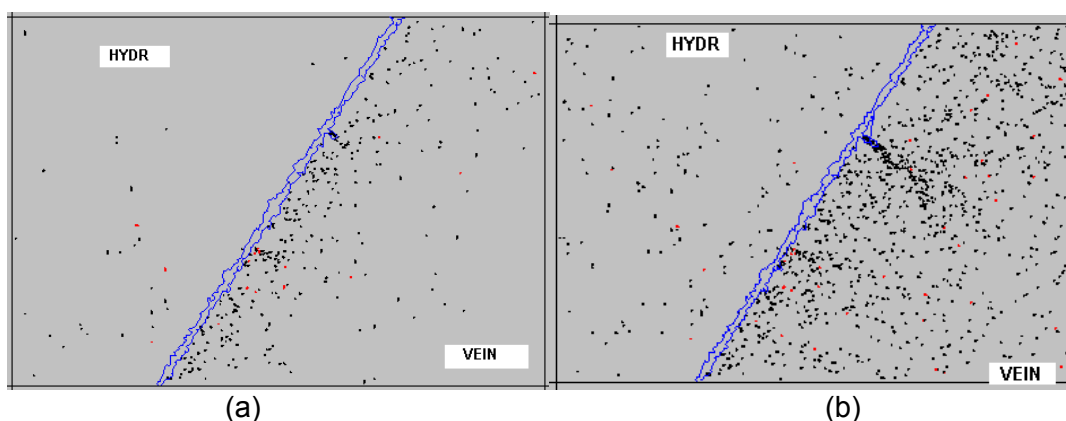
Toutes les particules du modèle ont une même température initiale ( $T_0$ ) égale à 150 °C. Des déplacements nuls sont imposés perpendiculairement à chacune des

parois. Des limites adiabatiques sont imposées sur toutes les parois. Six paliers de pressions hydrauliques sont appliqués progressivement dans la fracture :

41 MPa, 42 MPa, 42,5 MPa, 43 MPa, 43,5 MPa, 44,2 MPa

Les résultats sont présentés dans ce qui suit.

Dans le cas de la zone 3 également, de nombreuses micro-ruptures font leur apparition principalement dans le faciès de quartz dès la première heure de refroidissement des épontes (fig. 16).



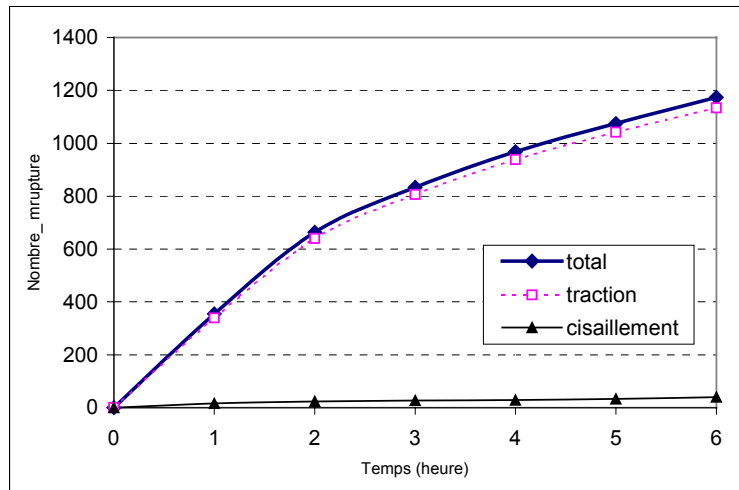
**Fig. 16 - Répartition des ruptures dans le modèle de la zone 3 après a) 1 heure et b) 6 heures (rouge : rupture en compression ; noir : rupture en traction).**

Pendant la première heure de sollicitation thermique, le pourcentage de contacts rompus entre les particules du faciès VEIN est largement supérieur à celui obtenu pour le faciès HYDR, soit 1,05 % contre 0,15 % (tabl. 10). Par ailleurs, ce même tableau montre que cet écart se creuse d'avantage avec la durée des sollicitations thermiques atteignant au bout de six heures près de 3,33 % dans le faciès VEIN pour seulement 0,67 % dans le faciès HYDR. En ce qui concerne le nombre total de micro-ruptures, ce dernier évolue nettement vite au moment du choc thermique où l'essentiel des micro-ruptures se localise à proximité des épontes, puis il accroit à peu près deux fois moins vite à l'issue des deux premières heures (fig. 17). Cette figure montre également que l'immense majorité des micro-ruptures se met en place par un mécanisme en traction, et que très peu ont pour origine un mécanisme en cisaillement.

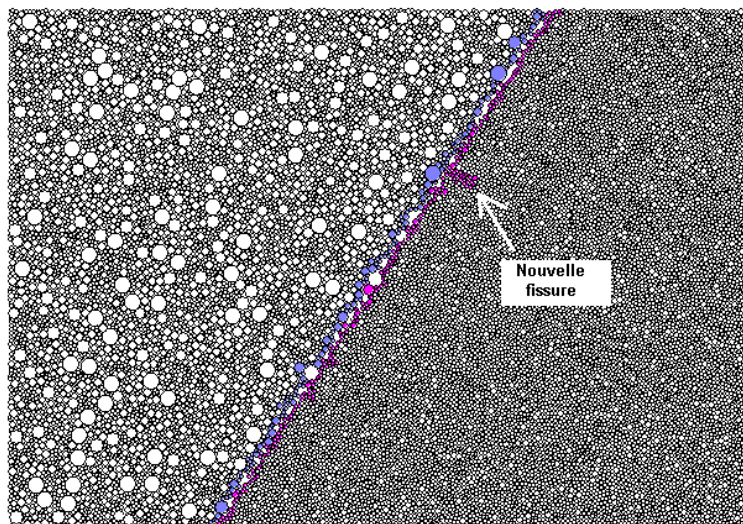
% de micro ruptures	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h
VEIN	1,05	1,87	2,29	2,69	3,02	3,33
HYDR	0,15	0,39	0,59	0,62	0,65	0,67
Total	0,6	1,27	1,59	1,85	2,05	2,24

**Tabl. 10 - Pourcentage de ruptures dans les différents faciès de la zone 3 en fonction du temps (conditions limites en déplacements + adiabatique).**

La formation d'une nouvelle fissure se propageant depuis l'éponte vers l'intérieur du faciès de quartz par un phénomène de coalescence des micro-ruptures se met en place dès la première heure et devient nettement visible après seulement deux heures de sollicitation thermique (fig. 18)



**Fig. 17 - Évolution en fonction du temps du nombre de micro-ruptures dans le modèle.**



**Fig. 18 - Initiation d'une nouvelle fissure à partir de l'éponte après 2 heures.**



## **ANNEXE 4**

# **Caractérisation de la zone fracturée supérieure dans le forage GPK1**

C. Dezayes, A. Genter (CDG/ENE)



# 1. Introduction

Lors de la modélisation des essais d'injection dans le puits GPK1, les forts débits absorbés dans la partie haute de l'open hole sous le tubage n'ont pu être modélisés de façon satisfaisante via la zone de faille n° 1 (Gentier *et al.*, 2002). Cette zone n'avait effectivement pas une réponse géologique forte sur les images de paroi. Le contexte structural vers la base du tubage a donc été repris et réanalysé. Ainsi il s'avère qu'il existe une importante zone fracturée à quelques dizaines de mètres au-dessus et qui a montré d'importantes pertes de boue lors du forage. En effet, bien que cette zone, que nous appellerons Z0, se situe derrière le tubage lors des essais de stimulation, il est fort possible qu'elle puisse jouer un rôle majeur par l'intermédiaire d'une connexion avec la zone Z1 qui recoupe le forage au sommet de l'open hole. Cette zone Z0 avait été parfaitement identifiée comme une zone perméable (forte anomalie de gaz) dès la foration de GPK1 (Genter *et al.*, 1995).

## 2. Caractérisation géométrique de la zone Z0

La zone Z0 se situe autour de 2 815 m. Les cotes de profondeur utilisées pour caractériser la zone Z0 sont celles indiquées par Schlumberger lors des mesures de diagraphies géophysiques (Gamma Ray spectral, caliper, densitométrie et sonic). Les cotes des images FMI effectuées le 7-12-1992 sont décalées d'environ 1 m vers le bas.

Elles ont été recalées avec les diagraphies classiques pour une meilleure comparaison. Lors des mesures diagraphiques, la profondeur du pied du tubage a été notée à 2 848 m. Or, le recalage effectué par Evans *et al.* (1996), pour obtenir une compatibilité avec les profils de débit (flow logs), monte le pied du tubage à 2 849,4 m. Ce sont ces dernières références de profondeurs qui ont été utilisées lors de la description des zones de fractures présentes dans l'open hole de GPK1 (Gentier *et al.*, 2002).

Nous considérons qu'à l'échelle de la modélisation, le décalage de 1,4 m entre ces deux références est négligeable et donc que les profondeurs énoncées dans la suite pour caractériser la zone Z0 sont compatibles avec les profondeurs des autres zones de l'open hole (Gentier *et al.*, 2002).

D'après l'image de paroi FMI, la zone considérée se situe entre 2 811 m et 2 817,5 m, avec une épaisseur totale de 6,5 m. Elle se décompose en plusieurs parties (fig. 1). Tout d'abord, une zone moyennement altérée de 2 811 m à 2 812 m, puis une zone fortement altérée jusqu'à 2 814 m. Les épontes de cette zone d'altération sont orientées respectivement N245°E-73° et N242°E-81° pour les limites supérieure et inférieure. Juste au-dessous, une fracture très conductrice est visible à 2 814,5 m dont la géométrie est modifiée par le décalage des patins de l'outil FMI à ce niveau. Suivant l'ajustement réalisé, l'orientation de cette fracture est relativement variable, soit N202°E-75°, soit N282°E-83°.

Entre cette fracture et 2 816 m, la paroi apparaît moins altérée avec quelques fines fractures visibles dont les orientations sont par exemple N276°E-74° et N228°E-70°. Dessous, à 2 816,4 m, apparaît une fracture très régulière, fortement conductrice sur environ 50 cm d'épaisseur verticale et probablement ouverte.

Ce plan, qui apparaît être le plan majeur de la zone, est orienté N229°E-72°. Entre ce plan et le bas de la zone proprement dite à 2 817,5 m, il apparaît de nouveau une zone fortement altérée avec une réponse similaire à la partie supérieure. La limite inférieure de la zone est orientée N208°E-74°. L'orientation moyenne de la zone se situe donc autour de N230°E-70°E à la cote moyenne 2 816,4 m.

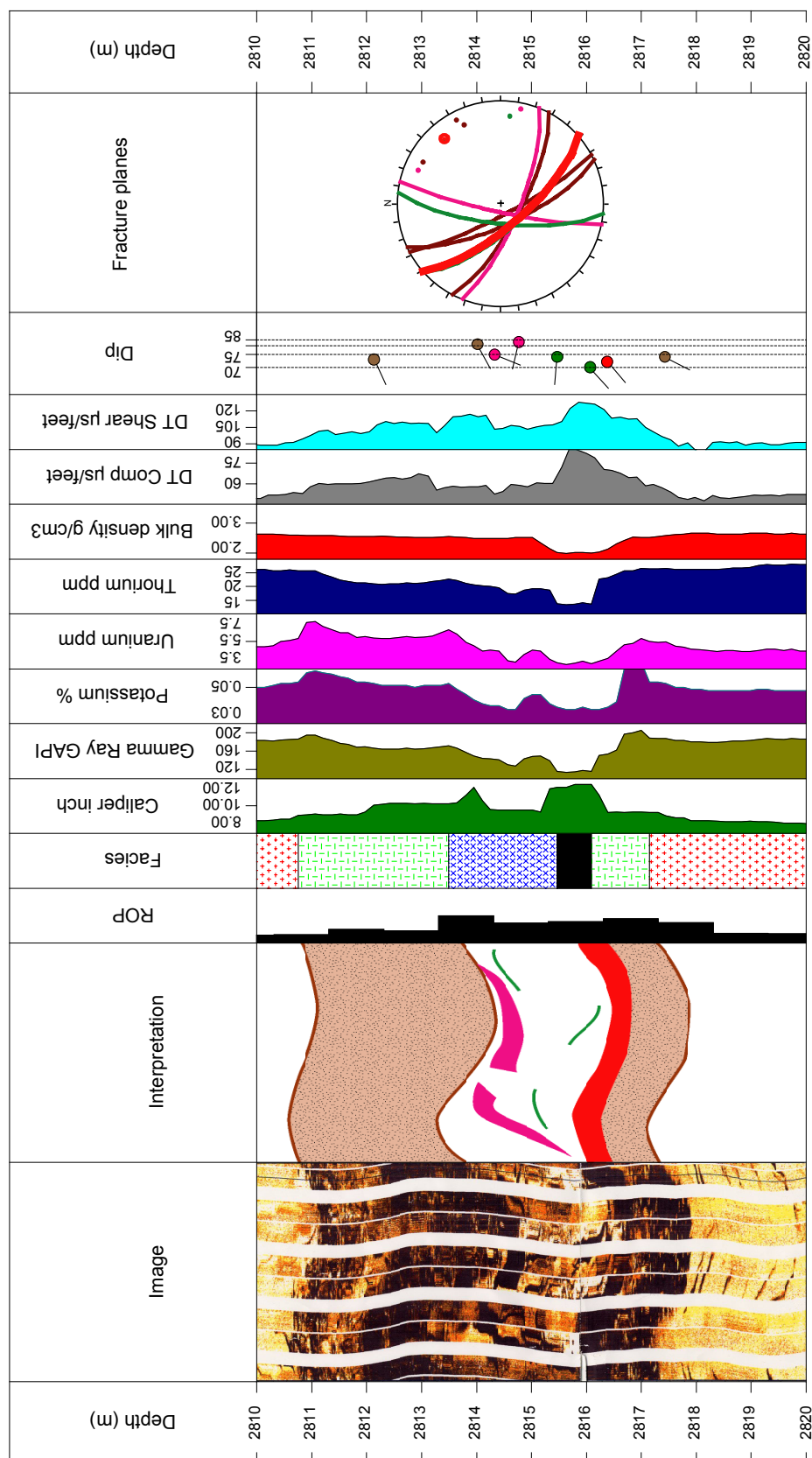
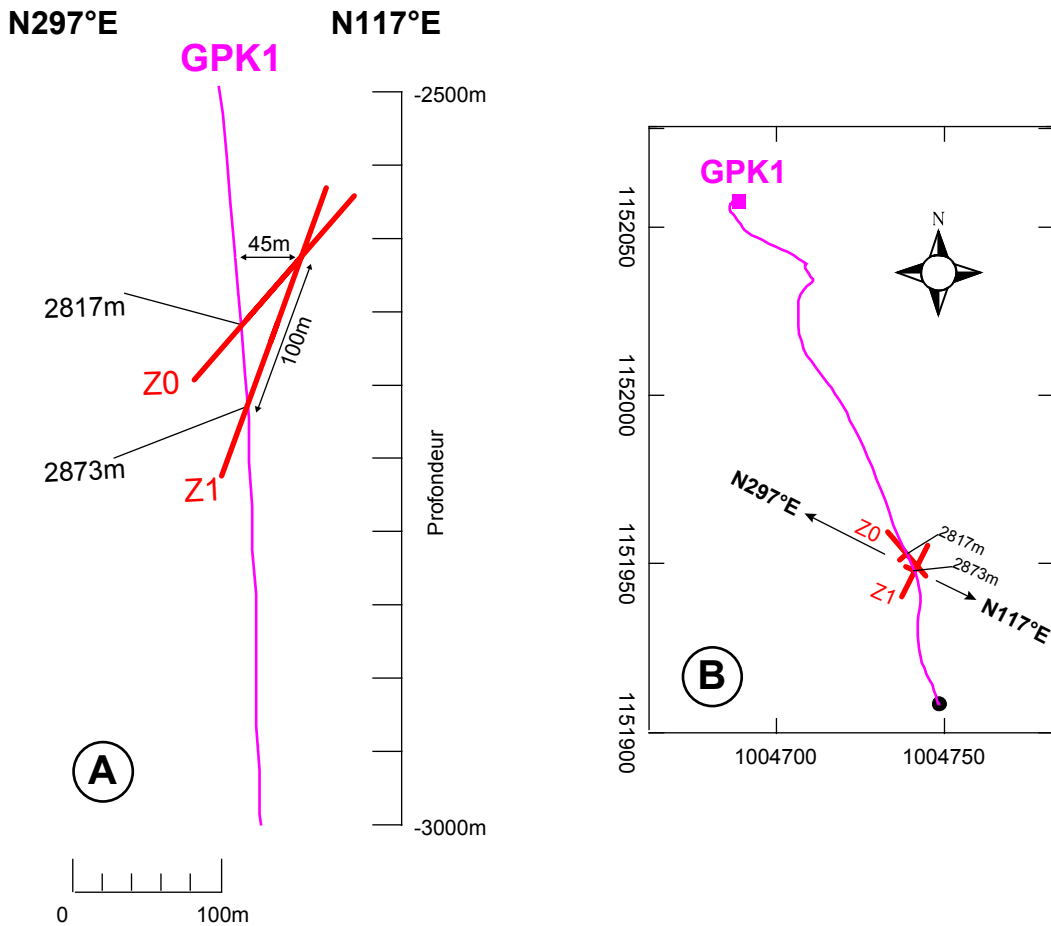


Fig. 1 - Log composite et interprétation géologique de la zone Z0 entre 2 810 m et 2 820 m.

À partir de ces données d'orientation et de position, nous pouvons localiser la zone Z0 par rapport à la zone Z1, zone hydrauliquement active au sommet de l'open hole. Cette zone Z1 recouperait Z0 à une distance de 100 m dans le plan perpendiculaire à Z0 vers le haut (fig. 2). L'intersection de ces deux plans se situe à une distance horizontale de 45 m du forage toujours dans le plan de plongement de Z0 (fig. 2).



**Fig. 2 - Localisation des zones Z0 et Z1. A : Coupe suivant la direction N297°E, direction de plongement du plan Z1. B : Vue en plan. Les symboles représentant les zones de fractures indiquent par leur grande barre l'azimut du plan et par la petite barre la direction de plongement du plan.**

### 3. Caractéristiques géophysiques de la zone Z0

La vitesse d'avancement de l'outil lors du forage (ROP) et différentes mesures par diagraphies sont disponibles au niveau de la zone étudiée (fig. 1). Il s'agit :

- d'un caliper, mesurant le diamètre du puits ;
- d'un gamma ray spectral, mesurant la radioactivité naturelle de la roche et permettant d'obtenir la mesure séparée de trois éléments : le potassium, l'uranium et le thorium ;
- d'une mesure de densité permettant d'apprécier la porosité de la roche ;
- d'un sonic, mesurant la lenteur des ondes de compression et de cisaillement dans la roche.

Les mesures de ROP montrent une vitesse d'avancement stable au-dessus de la zone Z0, puis une augmentation tout le long de la traversée de cette zone (fig. 1). Les autres paramètres de forages (poids sur l'outil, vitesse de rotation...) étant constants, cette augmentation signifie donc que la zone traversée est de moindre résistance que l'encaissant. Par ailleurs, le ROP au-dessous de la zone retrouve la même valeur qu'au-dessus.

La courbe du caliper montre une augmentation du diamètre du puits avec deux maxima correspondant au niveau des deux fractures les plus conductrices observées sur le FMI à 2 814,5 m et 2 816,4 m (fig. 1). À l'échelle de la zone, il existe donc une petite cave.

Les courbes de radioactivité présentent des tendances similaires. L'éponte supérieure de la zone est marquée par une augmentation de la radioactivité, surtout dans le cas du potassium et de l'uranium (fig. 1). Ceci indique une augmentation des minéraux argileux riche en potassium (présence d'illite) et qui montre une altération forte de l'éponte. À l'intérieur de la zone, les courbes de radioactivité décroissent avec deux minima aux niveaux des deux fractures conductrices observées sur l'image FMI. En fait, cette diminution est en partie artificielle et liée à l'élargissement du trou à ces niveaux. La détection des émissions radioactives est alors plus faible du fait de la distance plus grande. Au niveau de l'éponte inférieure, le même phénomène qu'au niveau de l'éponte supérieure est observé avec une augmentation de la radioactivité traduisant donc la présence d'une forte altération.

La mesure de densité montre une courbe stable avec une forte diminution au niveau de la fracture à 2 816,4 m que nous avons qualifiée de majeure lors de l'analyse du FMI (fig. 1). Ceci indique donc une certaine porosité de ce niveau et confirme le fait que c'est bien cette fracture à l'intérieur de la zone Z0 qui doit être prise en compte dans la modélisation des écoulements.

Les mesures de lenteur des ondes de compression et de cisaillement sont semblables. Une augmentation de ces lenteurs est observée tout le long de la zone (fig. 1). Ceci signifie une altération importante qui a tendance à ralentir les ondes. La lenteur des ondes de cisaillement montre un pic au niveau de la fracture 2 814,5 m alors que celle des ondes de compression ne semble pas affectée. En revanche, la seconde fracture à 2 816,4 m indique une forte augmentation des lenteurs des deux types d'ondes.

## 4. Caractérisation géologique de la zone Z0

L'analyse des caractéristiques géophysiques de la zone nous a amenés à réinterpréter, de manière plus précise, la géologie de la zone considérée réalisée au départ à partir de la simple observation des cuttings (fig. 1) :

- jusqu'à 2 810,75 m, les courbes géophysiques sont stables et il s'agit du granite porphyroïde standard riche en méga-cristaux de feldspaths potassiques (noté GRAN) ;
- de 2 810,75 m à 2 813,49 m, il apparaît une première zone altérée visible sur l'image FMI et caractérisée par une augmentation du gamma ray. Il s'agit donc d'un granite hydrothermalisé (noté HYDR) ;
- de 2 813,49 m à 2 815,47 m, les courbes de radioactivité sont très perturbées et il apparaît plusieurs fractures sur l'image FMI. Il s'agit donc d'une zone de granite bréchifié (noté BREC) ;
- de 2 815,47 m à 2 816,08 m, cette zone correspond au maximum d'anomalie de toutes les courbes de mesures géophysiques et à la fracture très conductrice observée sur l'image FMI. Il s'agit donc de la fracture principale (noté FRAC). Bien que nous n'ayons aucun indice sur la présence de quartz secondaire (VEIN), cette structure a des caractéristiques analogues aux zones de quartz identifiées dans d'autres forages ;
- de 2 816,08 m à 2 817,15 m, il apparaît de nouveau une augmentation des courbes de radioactivité et donc une seconde zone de granite altéré (noté HYDR) ;
- au-dessous de 2 817,15 m, les courbes géophysiques redeviennent stables et l'on se situe à nouveau dans le granite standard (noté GRAN).

Ces alternances montrant une augmentation de l'altération des épontes vers le cœur de la zone de faille est bien connue dans le granite de Soultz (Genter *et al.*, 2000).

## 5. Conclusions

Bien que cette zone Z0 soit située derrière le tubage, elle semble se connecter à la zone Z1, située juste au-dessous du tubage et qui est particulièrement hydrauliquement active malgré qu'elle soit caractérisée comme mineure. Cette zone Z0 a par ailleurs été identifiée pendant le forage comme perméable (Genter *et al.*, 1995). Elle comporte une zone de faciès altéré entourant une fracture majeure probablement ouverte, voir à remplissage de quartz, de la même manière que sont caractérisées les zones d'accès Z2 et Z3 (Gentier *et al.*, 2002). Cette zone Z0 est assez peu étendue, 6,5 m en vertical, entre 2 811 m et 2 817,5 m. La fracture majeure à l'intérieur de cette zone se situe à 2 816,5 m et possède une orientation N230°E-70°. Ces caractéristiques nous permettent de supposer que cette zone Z0 est une zone favorable à une circulation hydraulique

## 6. Références

- Genter A., Traineau H., Ledésert B., Bourguine B. and Gentier S. (2000) - Over 10 years of geological investigations within the HDR Soultz project, France. Proceedings World Geothermal Congress 2000 Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, p. 3707-3709.
- Genter A., Traineau H., Dezayes C., Elsass P., Ledesert B., Meunier A. and Villemin T. (1995) - Fracture analysis and reservoir characterization of the granitic basement in HDR Soultz project (France). *Geotherm. Sci. & Tech.* 4(3), 189-214.
- Gentier S., Genter A., Bourguine B., Chilès J.P., Delpont G., Riss J., Billaux D., Debecker F., Bruel D. (2002) - Modélisation de l'interface puits-échangeur (site de Soultz-sous-Forêts) : acquisition des données de base et développement préliminaires. BRGM/RP 51764-FR, 349 p., 25 fig., 7 tabl., 14 ann.
- Evans K., Kohl T., Hopkirk R., Ribach L. (1996) - Studies of the nature of non-linear impedance to flow within the fractured granitic reservoir at the European Hot Dry Rock Project site at Soultz-sous-Forêts, France. ETH Zürich Final Report July 1996, 144 p.

## **ANNEXE 5**

# **Révision des zones d'accès à l'échangeur dans le forage GPK2, de 3 200 à 3 600 m**

C. Dezayes, A. Genter (CDG/ENE)



## Introduction

Le forage GPK2 a été réalisé en deux phases : en 1995, il a été foré jusqu'à 3 880 m puis repris pour atteindre la cote de 5 100 m en 1999. Avant l'approfondissement du puits, une première phase hydraulique a été réalisée en septembre-octobre 1996 au niveau de l'open-hole entre 3 220 m et 3 600 m (Nicholls, 1996), les 300 derniers mètres ayant été obstrués accidentellement. Une seconde phase de test hydraulique a été effectuée dans la partie profonde du réservoir entre 4 500 et 5 100 m après l'approfondissement du forage.

Dans la partie supérieure de GPK2, les principales fractures permettant la connexion entre le puits et l'échangeur ont été caractérisées à partir d'images de paroi UBI dans le cadre de la convention précédente (Gentier *et al.*, 2002 ; p. 77). Depuis, après l'approfondissement du puits, de nouvelles imageries ont été réalisées au niveau de la même section. Ce sont ces données de bien meilleure qualité que nous désirons comparer aux précédentes imageries. De plus, une première modélisation de l'échangeur hydraulique a montré que les trois zones retenues antérieurement n'étaient pas suffisantes et qu'il fallait y adjoindre les zones profondes déterminées par Pribnow et Clauser (1998) et Tenzer *et al.* (1998) bien que présentant peu de débit (respectivement 10 % et 5 %). Nous avons donc réalisé une seconde caractérisation géométrique des cinq zones de fractures retenues à partir des nouvelles données d'imagerie UBI réalisée en 1999. Ces images étant de meilleure qualité, l'interprétation des fractures et la mesure de leur orientation apparaissent plus précises que lors de la première caractérisation. En outre, la stimulation des fractures par les injections de 1996 a permis de mieux faire apparaître les fractures sur les images.

Le calage en profondeur des images s'est fait dans les deux cas sur la base du tubage 9.625". Lors du premier run d'imagerie en 1995, Schlumberger indique la profondeur de ce repère à 1 428 m. En 1999, ce repère est noté à 1 423 m. Il existe donc un décalage de - 5 m entre le premier et le second run. Dans la suite de ce rapport, nous utiliserons les cotes du second run. En conséquence, il faut ajouter 5 m pour retrouver les cotes du premier run utilisées (Gentier *et al.*, 2002). Les profondeurs moyennes des zones caractérisées dans les deux repères sont indiquées dans le tableau 1 :

	UBI 1995	UBI 1999
<b>Z1</b>	3 247 m	3 242 m
<b>Z3</b>	3 350 m	3 342 m
<b>Z5</b>	3 470 m	3 462 m
<b>Z6b</b>	3 500 m	3 494 m
<b>Z6c</b>	3 566 m	3 559 m

**Tabl. 1 - Profondeur moyenne des zones de fracture étudiées dans les deux repères UBI de 1995 et 1999.**

Il faut noter également que dans la suite de ce rapport, ni l'interprétation des diagraphies classiques ni sur les mesures de débit n'ont été revues (Gentier *et al.*, 2002 ; Tenzer *et al.*, 1998 ; Pribnow & Clauser, 1998 ; Gérard *et al.*, 1999 et Pribnow & Jung, 1999).

La terminologie des zones retenues est celle employée par Pribnow & Clauser (1998). La correspondance avec la terminologie utilisée antérieurement (Gentier *et al.*, 2002) est indiquée dans le tableau 2.

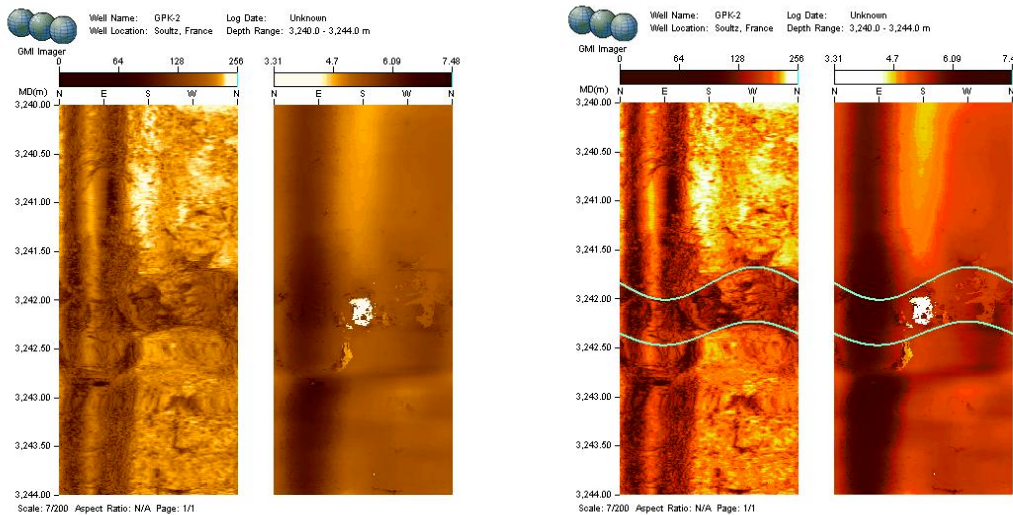
Pribnow & Clauser (1998)	Gentier <i>et al.</i> (2002)
Z1	Z1
Z3	Z2
Z5	Z3
Z6b	
Z6c	

**Tabl. 2 - Terminologie des différentes zones de fracture étudiées utilisée par les auteurs Pribnow & Clauser (1998) et Gentier *et al.* (2002).**

## 2. Zone 1

La zone 1 présente une zone altérée avec des épontes assez irrégulières qui peut être interprétée de deux manières.

Première interprétation : il s'agit de considérer simplement la zone altérée bien visible, qui présente une signature différente de l'encaissant, comme étant la zone de fracture hydrauliquement active (fig. 1). Les épontes sont bien marquées et peu inclinées. La partie sud de la zone apparaît comme ouverte. L'orientation des épontes supérieure et inférieure sont respectivement N94°E-50° et N92°E-40° (tabl. 3).



À gauche, l'image brute avec log en amplitude et log en temps de transit. À droite, l'image interprétée avec les plans mesurés.

**Fig. 1 - Image de paroi UBI vers 3 242 m représentant la zone 1.**

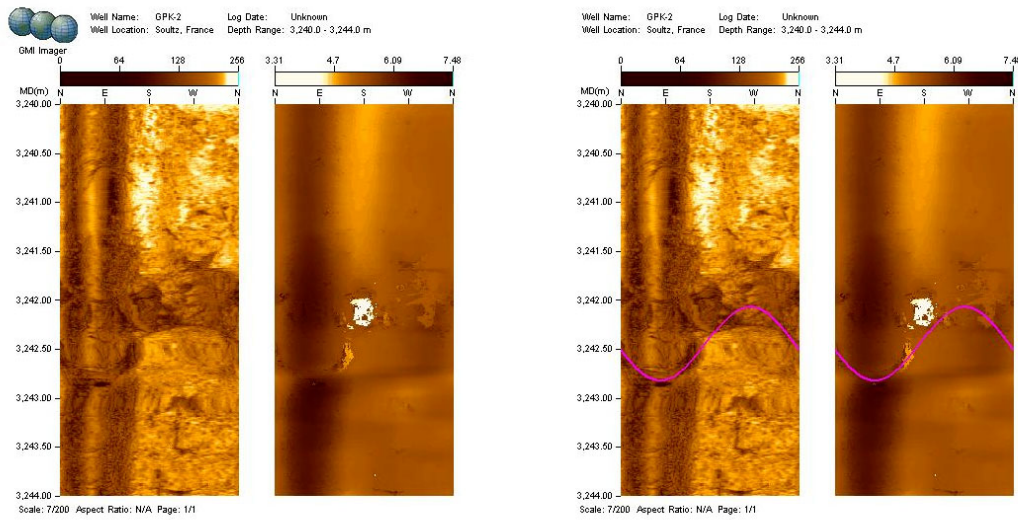
Depth(m)	Dip Dir(°)	Dip(°)	Commentaires
3 241,85	94,52	49,86	Limite supérieure
3 242,36	91,74	40,29	Limite inférieure
<b>3 242</b>	<b>93</b>	<b>45</b>	<b>Plan moyen: moyenne des 2 limites</b>

Les plans mesurés sont indiqués en bleu sur le stéréogramme (représentation de Schmidt, hémisphère inférieure). Le plan moyen est indiqué en gras dans le tableau de mesure et en rouge sur le stéréogramme.

**Tabl. 3 - Orientation des plans de fracture dans la zone 1.**

Deuxième interprétation : il existe une branche inférieure de sinusoïde légèrement sous cette zone altérée dans la moitié Est de l'image. Il est possible de faire passer une trace sinusoïdale par cette figure (fig. 2). Cette sinusoïde se corrèle alors avec des parties ouvertes du puits à l'intérieur de la zone altérée. L'orientation de cette fracture est alors N82°E-69° (tabl. 4).

D'après l'observation des images, il est difficile de trancher entre ces deux observations. Cependant, la deuxième interprétation met en évidence une fracture relativement inclinée qui apparaît plus en accord avec les fractures généralement actives à Soultz (fig. 3).

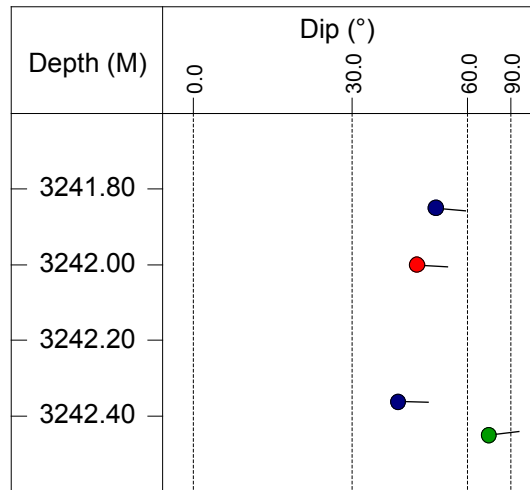


À gauche, l'image brute avec log en amplitude et log en temps de transit. À droite, l'image interprétée avec les plans mesurés.

**Fig. 2 - Deuxième interprétation de l'image de paroi UBI vers 3 242 m représentant la zone 1.**

Depth(m)	Dip Dir(°)	Dip(°)	Commentaires
3 242,45	81,71	68,75	Plan passant par les anomalies de TT (ouvertures)

**Tabl. 4 - Orientation du plan de fracture dans la zone 1 dans le cas de la seconde interprétation.**



La position des cercles indique la profondeur des fractures en ordonnées et leur inclinaison en abscisse. L'orientation de la barre indique la direction de plongement des fractures, le nord étant vers le haut et l'est à droite. Les symboles bleus représentent les plans mesurés et le symbole rouge est le plan moyen pour la première interprétation. Le symbole vert correspond au plan mesuré pour la deuxième interprétation.

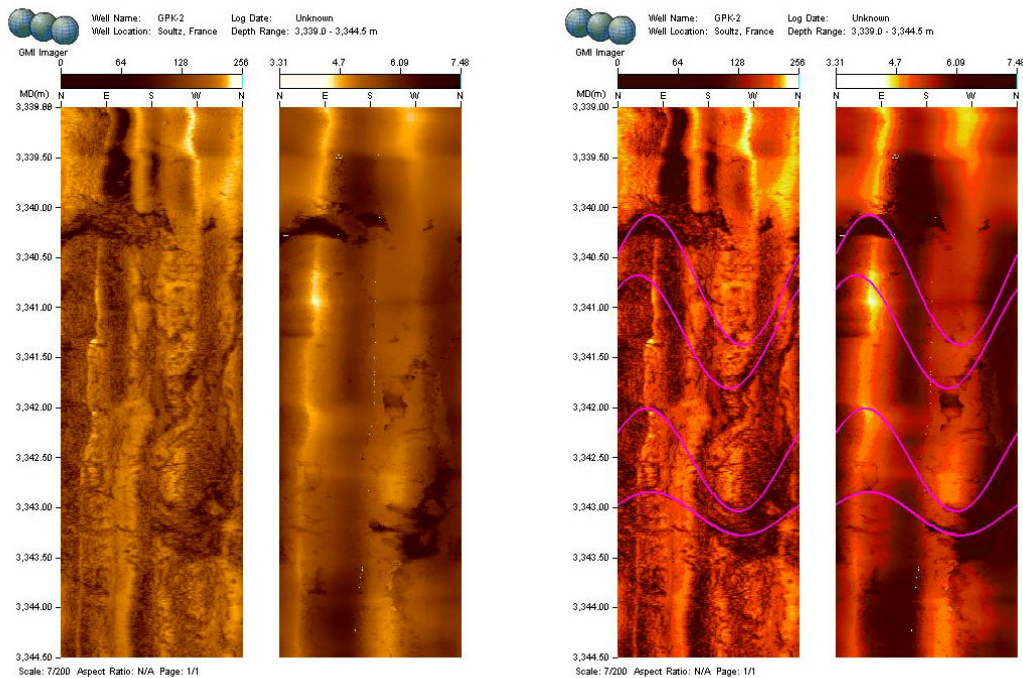
**Fig. 3 - Log de fracture dans la zone 1.**

### 3. Zone 3

La structure de la zone 3, qui avait été interprétée comme une fracture verticale (Gentier *et al.*, 2002), apparaît en fait sur ces nouvelles images de meilleure qualité, comme deux fractures principales marquées par une demi-sinusoïde ouverte et reliées entre elles par des déchirures verticales fermées (fig. 4).

Ces déchirures constituent une fracture verticale induite lors du forage. Ce genre de figure montrant une fracture verticale induite s'amorçant ou se terminant sur une fracture pré-existante est classique à Soultz (Dezayes, 1996). Ce type de fracture n'a généralement que peu d'extension et ne peut être considéré comme participant à la circulation hydraulique.

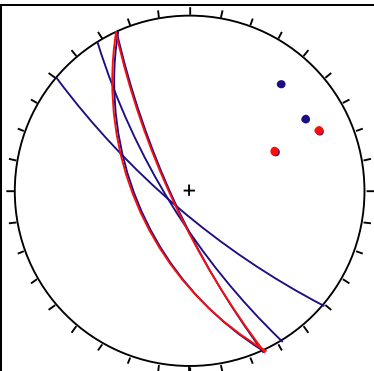
Les deux fractures principales possèdent des orientations respectivement N245°E-78° et N245°E-56° pour la fracture supérieure et la fracture inférieure (tabl. 5). Dans le détail et entre ces deux fractures principales, il existe d'autres fractures peu marquées orientées N238°E-75° et N245°E-57° (fig. 5).



À gauche, l'image brute avec log en amplitude et log en temps de transit. À droite, l'image interprétée avec les plans mesurés.

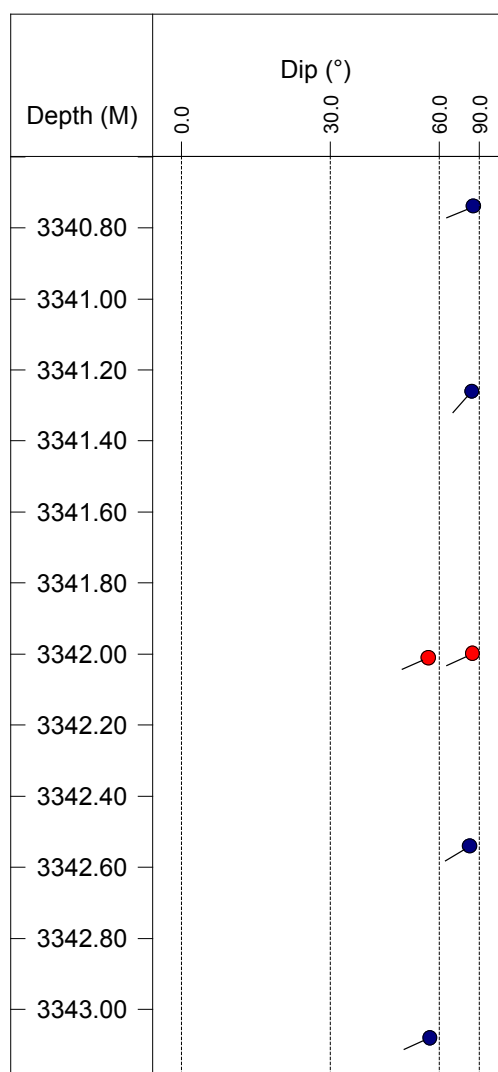
**Fig. 4 - Image de paroi UBI entre 3 340 m et 3 344 m représentant la zone 3.**

Depth(m)	Dip Dir(°)	Dip(°)	Commentaires
3 340,74	245,31	78,26	Fracture de la limite supérieure
3 341,26	220,51	77,25	Fracture interne
3 342,54	238,29	75,58	Fracture interne
3 343,08	245,59	56,6	Fracture de la limite inférieure
<b>3 342</b>	<b>245</b>	<b>78</b>	<b>Plan moyen: direction = dir des limites</b>
<b>3 342</b>	<b>245</b>	<b>56</b>	<b>Plgt = prendre entre ces deux valeurs</b>



Les plans mesurés sont indiqués en bleu sur le stéréogramme (représentation de Schmidt, hémisphère inférieur). Les valeurs moyennes de direction et une fourchette d'inclinaison sont indiquées en gras dans le tableau de mesure et en rouge sur le stéréogramme.

**Tabl. 5 - Orientation des plans de fracture dans la zone 3.**

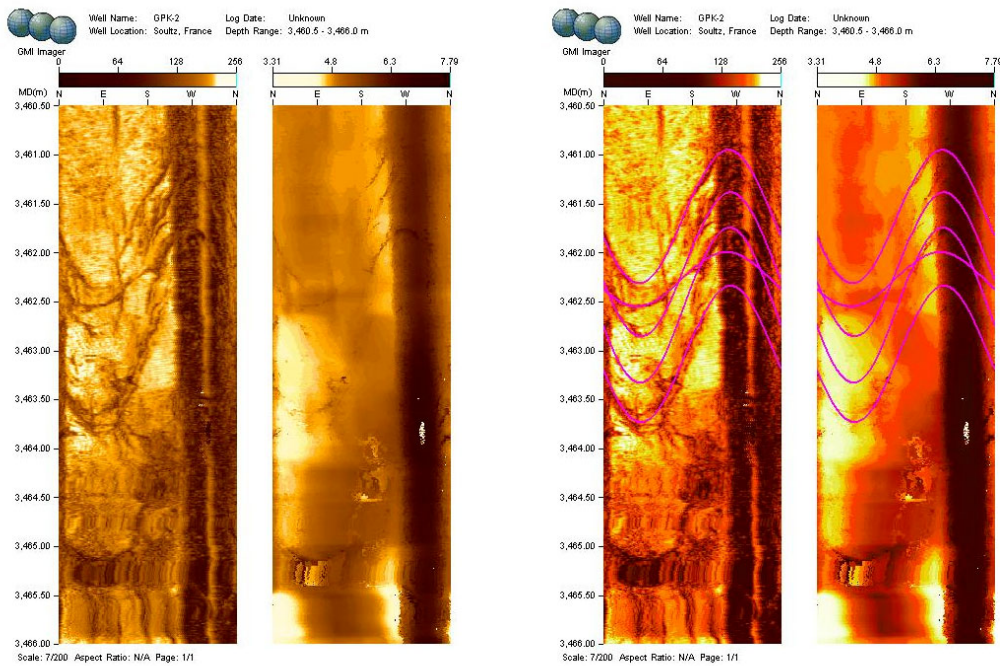


La position des cercles indique la profondeur des fractures en ordonnées et leur inclinaison en abscisse. L'orientation de la barre indique la direction de plongement des fractures, le nord étant vers le haut et l'est à droite. Les symboles bleus représentent les plans mesurés et les symboles rouges les plans moyens.

**Fig. 5 - Log de fracture dans la zone 3.**

## 4. Zone 5

Sur les nouvelles images, les fractures de la zone 5 sont beaucoup plus visibles. Cinq fractures sont bien marquées alors qu'elles ne l'étaient pas sur les images précédentes (fig. 6). Les fractures sont partiellement ouvertes. Quatre d'entre elles sont parallèles et très inclinées, orientées N75°E-79° (tabl. 6). La cinquième fracture est plus plate avec une direction similaire, N68°E-67° (fig. 7).



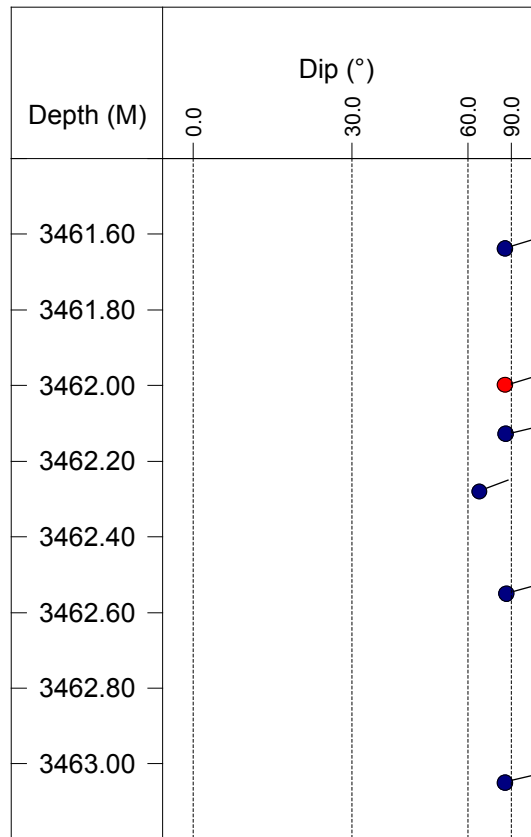
À gauche, l'image brute avec log en amplitude et log en temps de transit. À droite, l'image interprétée avec les plans mesurés.

**Fig. 6 - Image de paroi UBI entre 3 461 m et 3 466 m représentant la zone 5.**

Depth(m)	Dip Dir(°)	Dip(°)	Commentaires
3 461,64	71,87	78,81	Fracture fine
3 462,13	75,83	79,68	Fracture fine
3 462,28	68,26	64,45	Fracture fine
3 462,55	74,82	80,31	Fracture fine
3 463,05	75,85	78,97	Fracture fine
<b>3 462</b>	<b>74</b>	<b>79</b>	<b>Plan moyen: moyenne des limites de la zone</b>

Les plans mesurés sont indiqués en bleu sur le stéréogramme (représentation de Schmidt, hémisphère inférieure). La valeur moyenne est indiquée en gras dans le tableau de mesure et en rouge sur le stéréogramme.

**Tabl. 6 - Orientation des plans de fracture dans la zone 5.**



La position des cercles indique la profondeur des fractures en ordonnées et leur inclinaison en abscisse. L'orientation de la barre indique la direction de plongement des fractures, le nord étant vers le haut et l'est à droite. Les symboles bleus représentent les plans mesurés et le symbole rouge le plan moyen.

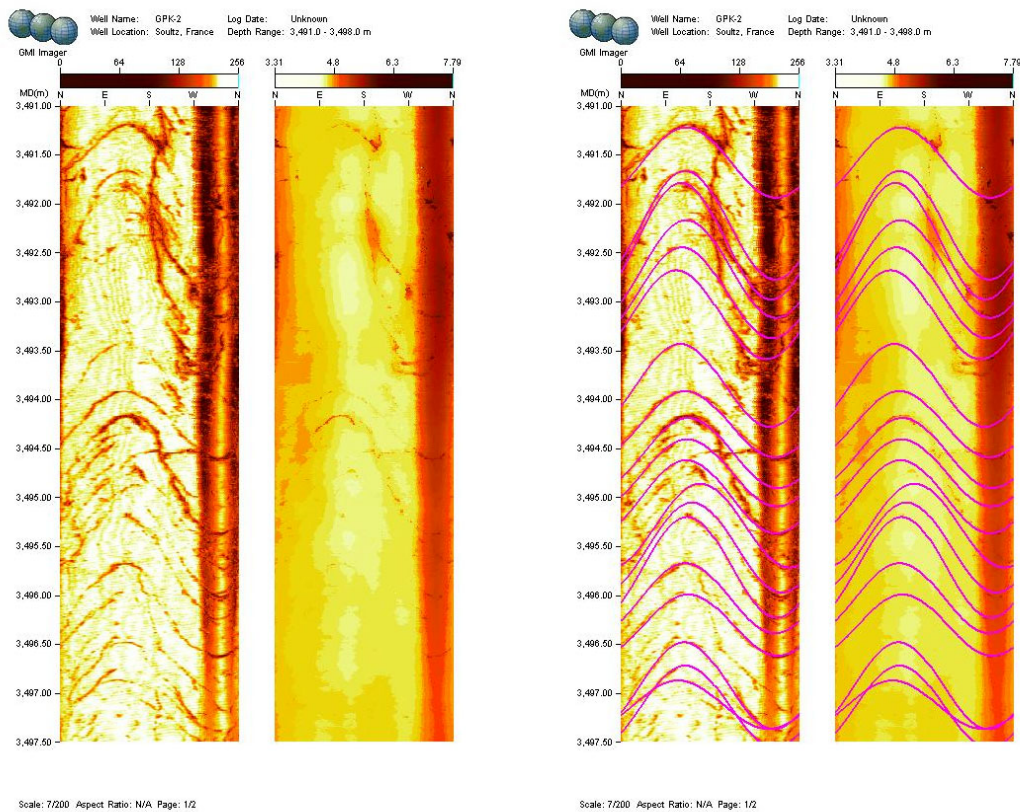
**Fig. 7 - Log de fracture dans la zone 5.**

## 5. Zone 6b

La zone 6b se présente comme une série d'une vingtaine de fractures parallèles et peu espacées (maximum 1 m) (fig. 8).

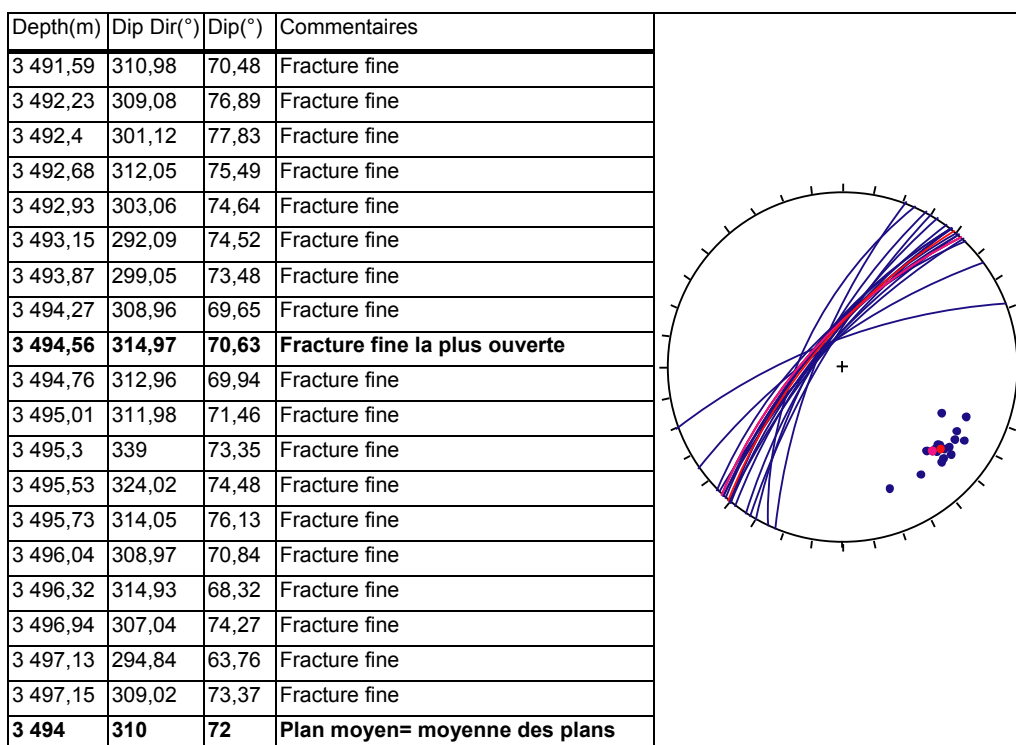
Les fractures sont fines et partiellement ouvertes. Il n'apparaît pas d'altération diffuse autour des fractures. La fracture la plus ouverte se situe à 3 494,56 m et a pour orientation N315°E-71° (tabl. 7, fig. 9). L'orientation moyenne de toutes les fractures est N310°E-72°.

La fracture la plus ouverte serait plus susceptible d'être le drain principal, mais on peut également considérer la moyenne des plans qui ont des directions cohérentes, voire une valeur comprise entre tous les plans (fig. 9).



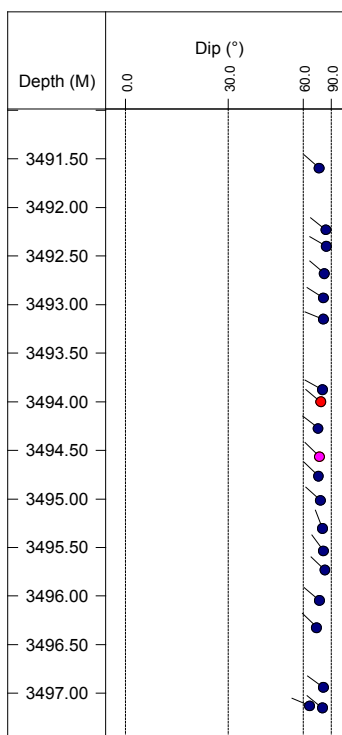
À gauche, l'image brute avec log en amplitude et log en temps de transit. À droite, l'image interprétée avec les plans mesurés.

**Fig. 8 - Image de paroi UBI entre 3 461 m et 3 497 m représentant la zone 6b.**



Les plans mesurés sont indiqués en bleu sur le stéréogramme (représentation de Schmidt, hémisphère inférieure). La valeur moyenne et la fracture la plus ouverte sont indiquées en gras dans le tableau de mesure et en rouge sur le stéréogramme.

**Tabl. 7 - Orientation des plans de fracture dans la zone 6b.**



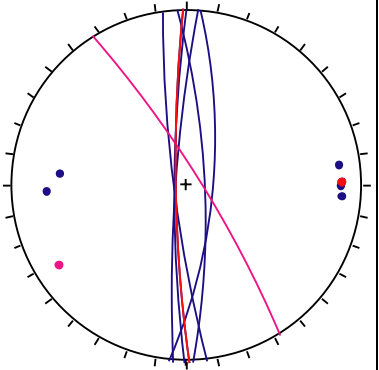
La position des cercles indique la profondeur des fractures en ordonnées et leur inclinaison en abscisse. L'orientation de la barre indique la direction de plongement des fractures, le nord étant vers le haut et l'est à droite. Les symboles bleus représentent les plans mesurés, le symbole rouge le plan moyen et le symbole rose la fracture la plus ouverte.

**Fig. 9 - Log de fracture dans la zone 6b.**

## 6. Zone 6c

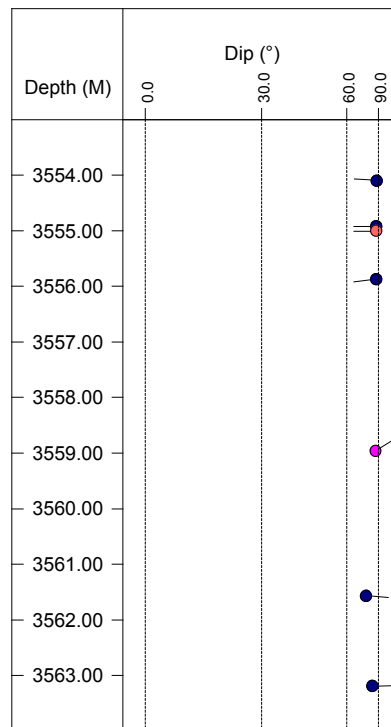
La zone 6c se présente comme une zone très altérée et très fracturée (fig. 11). La partie supérieure est marquée par des fractures très inclinées vers l'Ouest, d'orientation moyenne N269°E-83°(tabl. 8, fig. 9). Au centre de la zone, à 3 559m, une fracture importante très ouverte est également très inclinée mais vers l'Est, d'orientation N58°E-81°. Ce changement de direction se poursuit dans la partie inférieure de la zone avec des fractures plus plates inclinées vers l'Est. L'éponte inférieure de la zone est difficile à définir (fig. 11).

Depth(m)	Dip Dir(°)	Dip(°)	Commentaires
3 554,09	274,22	83,22	Limite supérieure
3 554,92	270,36	82,71	Fracture difficile à interpréter
3 555,86	262,7	82,65	Fracture difficile à interpréter
<b>3 558,96</b>	<b>57,72</b>	<b>81,17</b>	<b>Fracture épaisse très ouverte</b>
3 561,56	95,2	71,71	Fracture difficile à interpréter
3 563,19	87,31	77,08	Fracture difficile à interpréter
<b>3 555</b>	<b>269</b>	<b>83</b>	<b>Plan moyen de la partie supérieure: moyenne des 3 premiers</b>



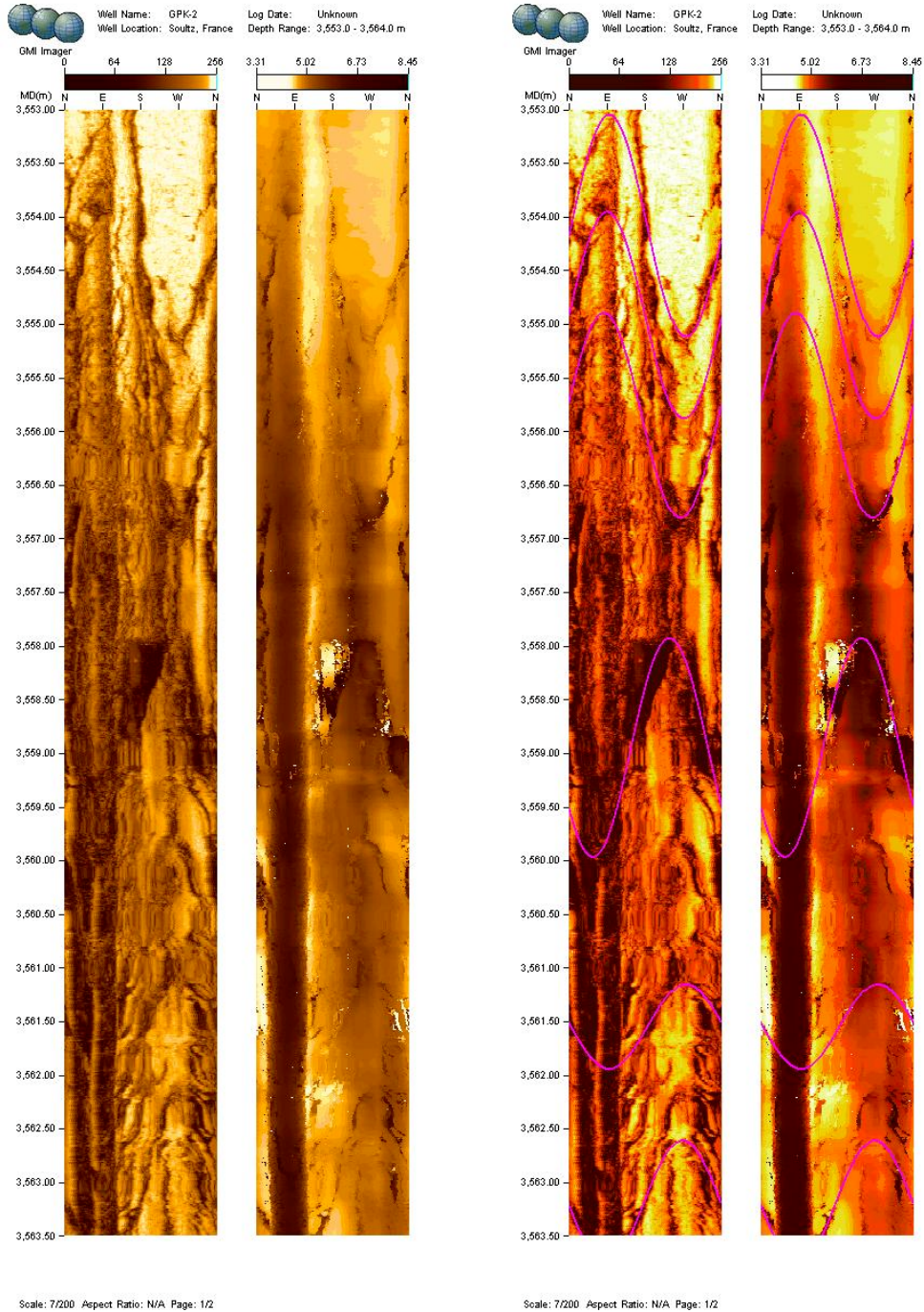
Les plans mesurés sont indiqués en bleu sur le stéréogramme (représentation de Schmidt, hémisphère inférieur). La valeur moyenne et la fracture la plus ouverte sont indiquées en gras dans le tableau de mesure et en rouge sur le stéréogramme.

**Tabl. 8 - Orientation des plans de fracture dans la zone 6c.**



La position des cercles indique la profondeur des fractures en ordonnées et leur inclinaison en abscisse. L'orientation de la barre indique la direction de plongement des fractures, le nord étant vers le haut et l'est à droite. Les symboles bleus représentent les plans mesurés, le symbole rouge le plan moyen et le symbole rose la fracture la plus ouverte.

**Fig. 10 - Log de fracture dans la zone 6c.**



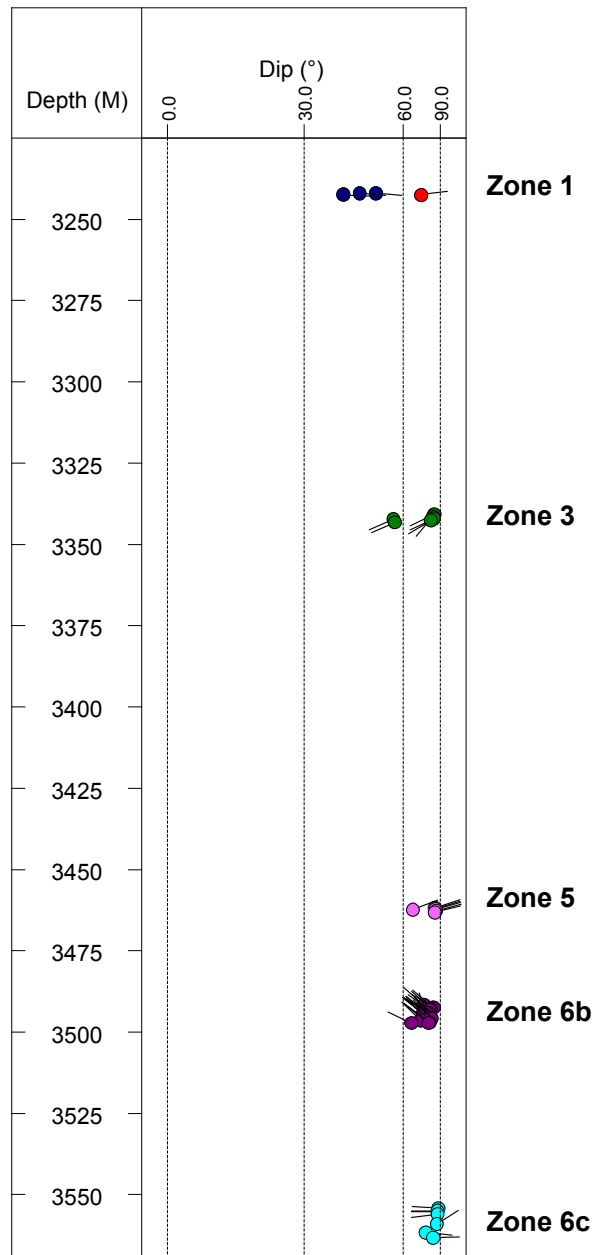
À gauche, l'image brute avec log en amplitude et log en temps de transit. À droite, l'image interprétée avec les plans mesurés.

**Fig. 11 - Image de paroi UBI entre 3 553 m et 3 583 m représentant la zone 6c.**

## 7. Conclusions

Les zones de fractures permettant l'accès à l'échangeur géothermique depuis le puits GPK2 sont organisées de différentes manières (fig. 12) :

- les zones 1 et 3 sont constituées de fractures individuelles bien marquées ;
- les zones plus profondes 5, 6b, 6c sont formées d'un certain nombre de fractures fines et peu marquées qui apparaissent plutôt comme des clusters.

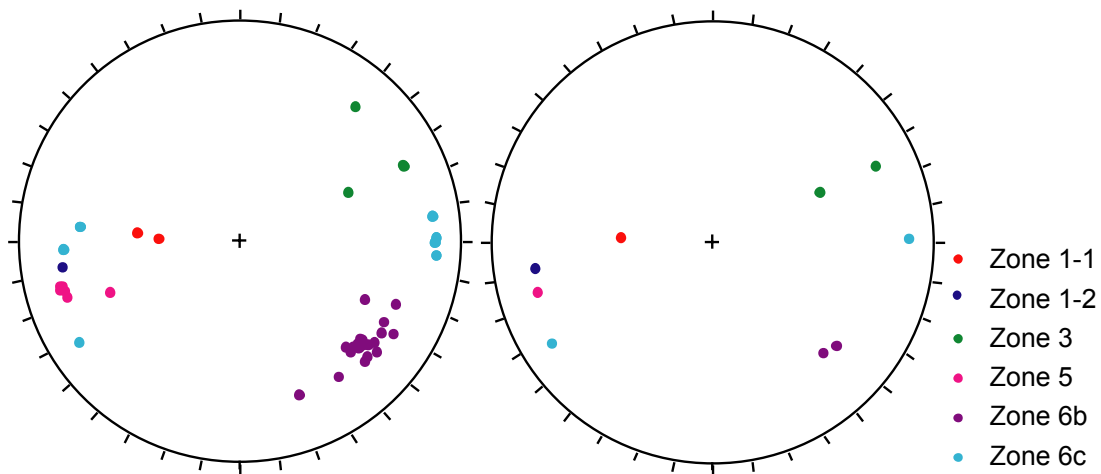


**Fig. 12 - Log de fracture de toutes les zones hydrauliquement actives de la partie supérieure de GPK2.**

La position des cercles indique la profondeur des fractures en ordonnées et leur inclinaison en abscisse. L'orientation de la barre indique la direction de plongement des fractures, le nord étant vers le haut et l'est à droite.

Pour la zone 1, les symboles bleus indiquent les fractures mesurées dans le cas de la première interprétation et le symbole rouge, le fracture mesurée dans le cas de la deuxième interprétation.

L'orientation générale de ces zones montre un réseau sub-méridien d'inclinaison assez fort (de 56° à 83°) autant vers l'est que vers l'ouest (fig. 13).



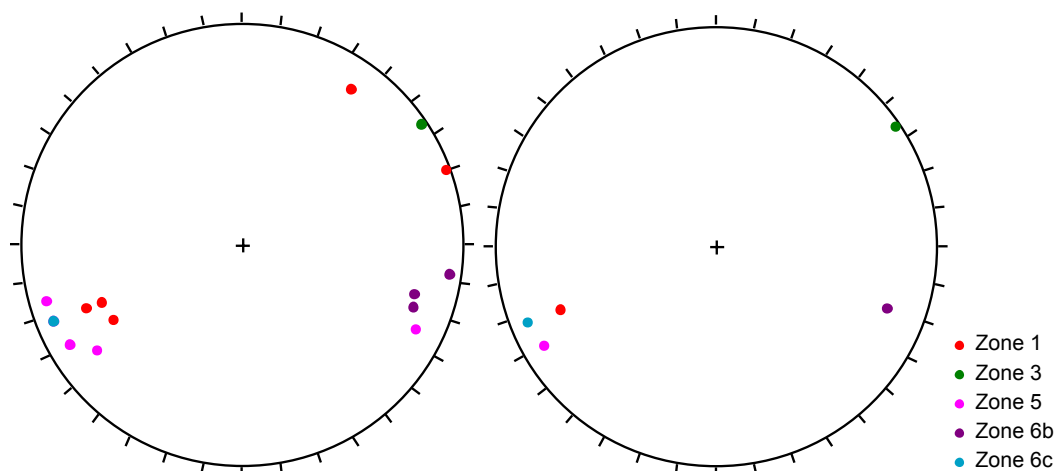
À gauche sont représentées toutes les fractures mesurées pour les différentes zones. À droite ne sont représentées que les valeurs moyennes retenues.

**Fig. 13 - Orientation des différentes zones de GPK2.**

Par rapport à l'analyse réalisée d'après les imageries de 1995 (Gentier *et al.*, 2002), les orientations des fractures mesurées dans un cas comme dans l'autre sont équivalentes en ce qui concerne les directions.

En revanche, les inclinaisons apparaissent plus importantes pour les mesures anciennes de 1995 (fig. 14). Cette différence provient du fait que les images étaient de moins bonne qualité et certaines interprétations difficiles à réaliser. Ainsi, certains pendages ont été exagérés.

Par ailleurs, outre la qualité des enregistrements de 1999 qui ont facilité l'interprétation et permis d'interpréter un plus grand nombre de structures, les stimulations antérieures du puits ont mis en évidence des fractures plus ou moins colmatées et donc plus difficiles à distinguer auparavant.



À gauche sont représentées toutes les fractures mesurées pour les différentes zones. À droite ne sont représentées que les valeurs qui ont été prises en compte dans les modélisations.

**Fig. 14 - Orientation des zones mesurées dans les imageries de 1995 (Gentier et al., 2002).**

## 8. Références

- Gentier S., Genter A., Bourguine B., Chilès J.P., Delpont G., Riss J., Billaux D., Debecker F., Bruel D. (2002) - Modélisation de l'interface puits-échangeur (site de Soultz-sous-Forêts) : acquisition des données de base et développement préliminaires. BRGM/RP 51764-FR, 349 p., 25 fig., 7 tabl., 14 ann.
- Gérard. A., Baumgartner J., Baria R., Jung R., Gentier S., Genter A. (1998) - Element for a conceptual model of the under ground heat exchanger at Soultz-sous-Forêts, France. Situation, beginning 1998. International Hot Dry Rock (HDR) Forum, Strasbourg, France, Sept. 28-30th 1998.
- Nicholls J. (1997 - 1996) - Production logging report, Socomine report, 2/12/1996, 17p.
- Pribnow D, Clauser C. (1998) - Heat-and-fluid flow in the Rhine graben : regional and local models for a Hot Dry Rock system. International Hot Dry Rock (HDR) Forum, Strasbourg, France, Sept. 28-30th 1998.
- Pribnow D., Jung R. (1999) - Thermal and hydraulic data collected from 1987 to 1998 at the HDR Site Soultz-sous-Forêts, Open File Report GCA 118 658, 14 p.
- Tenzer H., Schanz U, Homeier G. (1998) - Development and characterization of a HDR heat exchanger at the HDR test site Soultz-sous-Forêts : Flow logs, joint system and hydraulic active fractures, International Hot Dry Rock (HDR) Forum, Strasbourg, France, Sept. 28-30th 1998.



## **ANNEXE 6**

# **Le logiciel 3DEC/FLO : rappels**

X. Rachez, D. Billaux (Itasca Consultants)  
Extrait du rapport 03-002/B



## Le logiciel 3DEC/FLO

### CALCUL MÉCANIQUE

*3DEC* (3-Dimensional Distinct Element Code), développé initialement par Cundall (1988), est un logiciel modélisant les interactions d'un assemblage de blocs polyédriques convexes ou concaves dont les faces sont des polygones quelconques.

Ces blocs sont définis par un champ de fracturation qui peut être régulier, quelconque et spécifié par l'utilisateur, ou aléatoire. Les discontinuités représentent des conditions aux limites pour chaque bloc, traité comme un milieu déformable ou rigide. Les mouvements relatifs le long des fractures sont gouvernés par des lois incrémentales linéaires ou non, dans les directions normales et tangentielles à chacune des fractures. Les déplacements peuvent être d'amplitude quelconque, et la résolution peut être lancée en mode statique ou dynamique (prise en compte des effets inertiels).

La méthode des Eléments Distincts utilisée par *3DEC* (Itasca, 1998) est basée sur un schéma de résolution explicite qui assure la stabilité de la simulation numérique même lorsque les phénomènes physiques modélisés sont instables. Par ailleurs, sa formulation incrémentale permet à l'utilisateur de modifier ou de réécrire les lois de comportement des blocs ou des joints déjà incluses dans le code. Un langage de programmation, *FISH*, donne toute latitude à l'utilisateur d'automatiser la construction du modèle, d'intervenir sur la résolution et d'écrire des procédures spécifiques de dépouillement des résultats.

### LE COUPLAGE HYDROMÉCANIQUE

La prise en compte du couplage dans les milieux fracturés montre quelques spécificités qui gouvernent l'approche de modélisation.

Tout d'abord, nous sommes confrontés à deux difficultés « numériques » : la conductivité d'un joint varie fortement avec son épaisseur, et surtout, la faible ouverture des joints (comparée à la taille des blocs) fait apparaître très rigide le fluide qui les remplit. Typiquement, la roche est au moins 1 000 fois moins rigide que l'eau piégée dans les joints.

Ensuite, les constantes de temps dépendent plus des propriétés globales d'un tel système et de son mode de déformation que de ses propriétés locales. Par exemple, le module volumique de l'eau a peu d'influence sur les vitesses de propagation.

À partir de ces constatations, une procédure originale de calcul couplé a été mise en œuvre dans le code aux éléments distincts à deux dimensions UDEC (ITASCA, 2000). Damjanac (1996) a par la suite entrepris une extension de *3DEC* au

couplage hydromécanique et a démontré la validité et la faisabilité de la procédure. Enfin, dans le cadre de ce projet, l'algorithme du couplage et le réseau d'écoulement « dual » de l'assemblage des blocs, ont été implémentés dans la version actuelle de *3DEC* (Damjanac, 2000).

Comme indiqué précédemment, le modèle du solide consiste en un assemblage de blocs à trois dimensions qui interagissent mécaniquement le long d'interfaces qui peuvent glisser ainsi que se séparer. Les interfaces ou « joints » entre les blocs solides sont remplis de fluide qui migre en fonction du champ de pression. L'écoulement du fluide dans les joints est laminaire, alors que celui au sein des blocs est négligé ; tout l'écoulement a donc lieu le long des joints. L'écoulement est monophasique : les joints sont complètement saturés ou complètement secs.

Les joints sont représentés par des plans qui découpent le modèle solide et s'intersectent sous des angles arbitraires. Les réseaux de blocs solides et d'écoulement sont générés automatiquement à partir de la géométrie de la masse rocheuse (avant que celle-ci ne soit découpée par des joints), et de celle des plans d'écoulement.

La résolution numérique des écoulements transitoires dans les joints est accomplie en utilisant une technique de différences finies avec avancement dans le temps.

À chaque pas de temps du calcul d'écoulement, les écoulements entre mailles sont tout d'abord calculés à partir du champ des pressions.

Ensuite, à temps constant, l'excès (ou le défaut) de volume de fluide dans chaque domaine est corrigé en effectuant des cycles mécaniques au cours desquels la pression d'eau est modifiée proportionnellement à ce « volume non équilibré » (fig. 1). Au cours de cette phase, nous résolvons l'ensemble des équations mécaniques par relaxation dynamique, et donc le fluide « voit » la rigidité globale du massif.

Cette procédure permet de traiter des problèmes pour lesquels l'effet du couplage et le caractère fracturé du milieu sont prépondérants.

Une description plus complète des détails numériques est disponible dans Damjanac (1996, 2000).

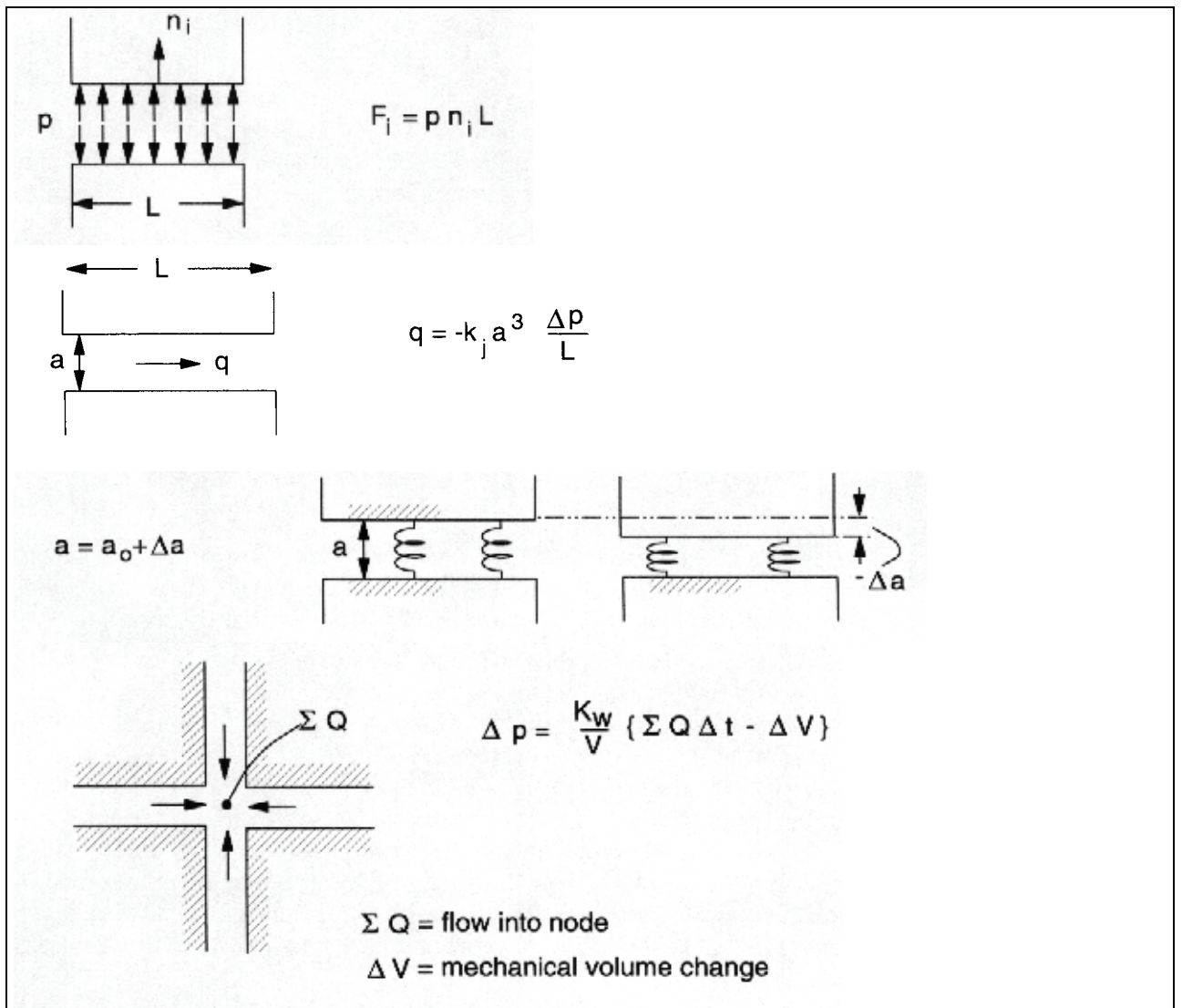


Fig. 1 - Mise en œuvre du couplage hydromécanique dans 3DEC.

## Références

- Cundall P.A. (1988) - Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model - Part 1. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. E Geomech. Abstr.*, 107-116.
- Damjanac B. (1996) - Three-Dimensional Numerical Model of Fluid Flow in Fractured Rock Mass. Ph. D. thesis, University of Minnesota.
- Damjanac B., Rachez X. (2000) - Développement du couplage hydro-mécanique dans 3DEC. Rapport Itasca 00-025/A, 31 p.
- ITASCA (2000) - *UDEC* Universal Distinct Element Code (3.1 ed.). User's Manual. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN.
- ITASCA (1998) - *3DEC*, 3 Dimensional Distinct Element Code (2.0 ed.). User's Manual. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN.

## **ANNEXE 7**

# **Modélisation de la stimulation du forage GPK1**

A. Hosni, S. Gentier (CDG/ENE)



# 1. Raideur variable

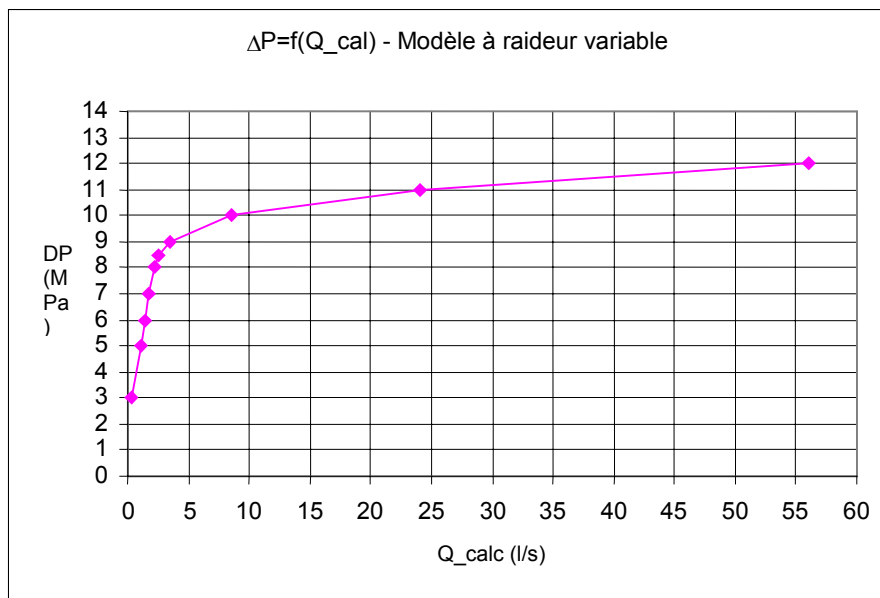
## 1.1. MODÈLE 4

Les valeurs des paramètres hydromécaniques sont récapitulées dans le tableau ci-dessous (tabl. 1). Notons que même si les raideurs maximales ont été divisées par deux par rapport aux calculs précédents (soit 150 000 MPa/m), elles demeurent néanmoins suffisamment élevées pour assurer un comportement élastique des fractures pendant les premiers paliers de pression.

	$K_{n,min}$ (Mpa/m)	$K_{n,max}$ (Mpa/m)	$K_{s,min}$ (Mpa/m)	$K_{s,max}$ (Mpa/m)	Frot. Initial	Frot. Résid	rugosité	$a_{res}$	$a_0$	$a_{max}$
Fract.	80 000	150 000	80 000	150 000	50°	35°	10 mm	$10^{-8}m$	$6 \cdot 10^{-7}m$	$10^{-3}m$

**Tabl. 1 - Paramètres hydromécaniques des fractures du modèle 4.**

Le comportement hydraulique global qui est obtenu à la fin de la simulation est présenté dans la figure ci-dessous (fig. 1).



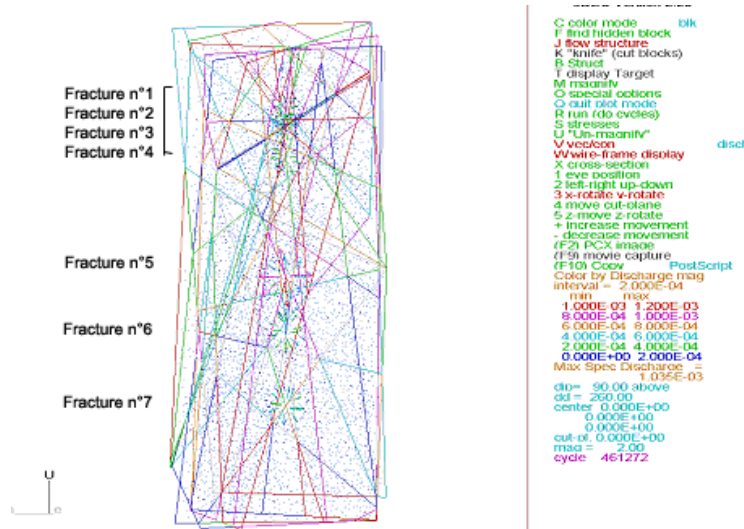
**Fig. 1 - Courbe pression-débit calculée pour le modèle 4.**

Les conclusions qui peuvent être tirées à ce stade sont les suivantes :

- l'introduction de la loi à raideur variable a permis une amélioration qualitative du comportement hydraulique calculé. En effet, la pente de la courbe débit-pression est moins raide au début des stimulations que dans les calculs précédents et diminue

plus progressivement vers sa valeur nulle, contrairement au modèle 2 précédent (fig. 1) ;

- jusqu'à une surpression de 9 MPa dans le puits, le débit injecté dans chacune des fractures est en moyenne égale à 0,5 l/s sauf dans la fracture N° 5 où ce dernier atteint 1,03 l/s (fig. 2).



**Fig. 2 - Répartition des débits injectés correspondant à une surpression dans le puits de 9 MPa (modèle 4).**

Dès que la surpression appliquée dans le puits atteint 10 MPa, l'essentiel des fluides accèdent à l'échangeur par la fracture n° 5 avec un débit de 8,55 l/s (fig. 3). L'ouverture hydraulique maximale (1 mm) est atteinte dans le plan de la fracture sur un rayon d'environ 40 m autour du puits et une ouverture d'au moins 0,5 mm s'est propagée sur les 60 premiers mètres (fig. 4).

Contrairement aux calculs antérieurs (cf. modèle 2), le radoucissement progressif des raideurs en fonction des contraintes a eu comme effet un relâchement progressif des contraintes de cisaillement dans les zones à fortes pressions hydrauliques (zones à proximité du puits), et un report sur les zones en aval où les contraintes de cisaillement augmentent.

Pour illustrer ce mécanisme, les contraintes normales et tangentielles ont été calculées en trois points appartenant au plan de la fracture n° 5 et alignés suivant la direction horizontale nord-sud à une distance de 25 m, 75 m et 125 m du puits. Le point positionné à 75 m se trouve juste en aval de la zone où de fortes pressions se sont développées au palier de 10 MPa.

En ce point, on peut noter une augmentation de la contrainte de cisaillement passant de 12,54 MPa à 13,75 MPa (fig. 5).

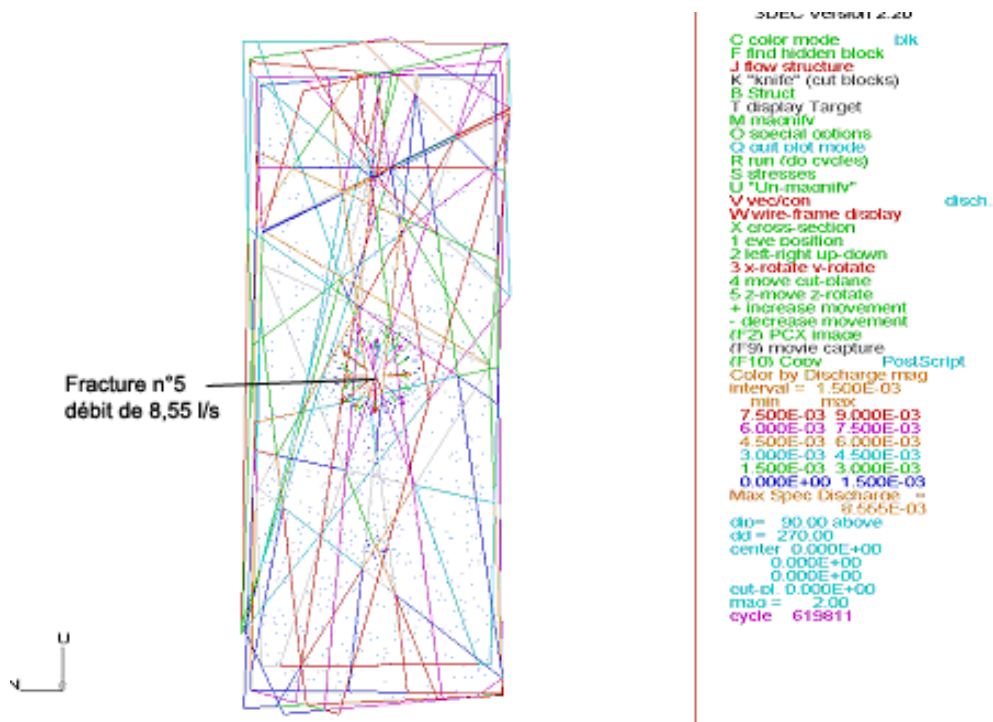


Fig. 3 - Répartition des débits injectés correspondant à une surpression dans le puits de 10 MPa (modèle 4).

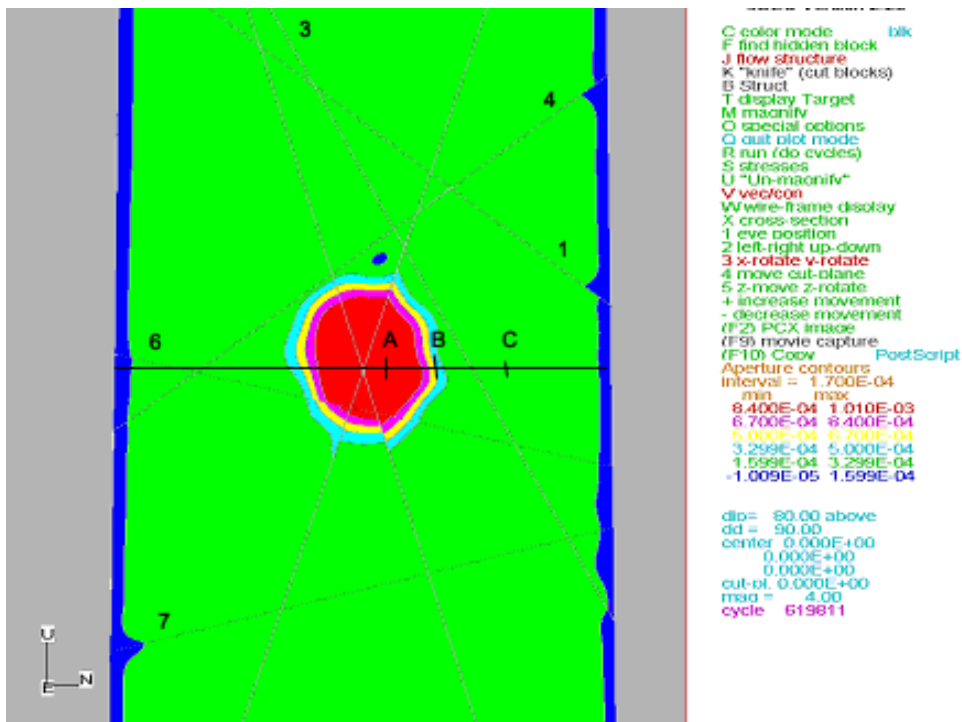
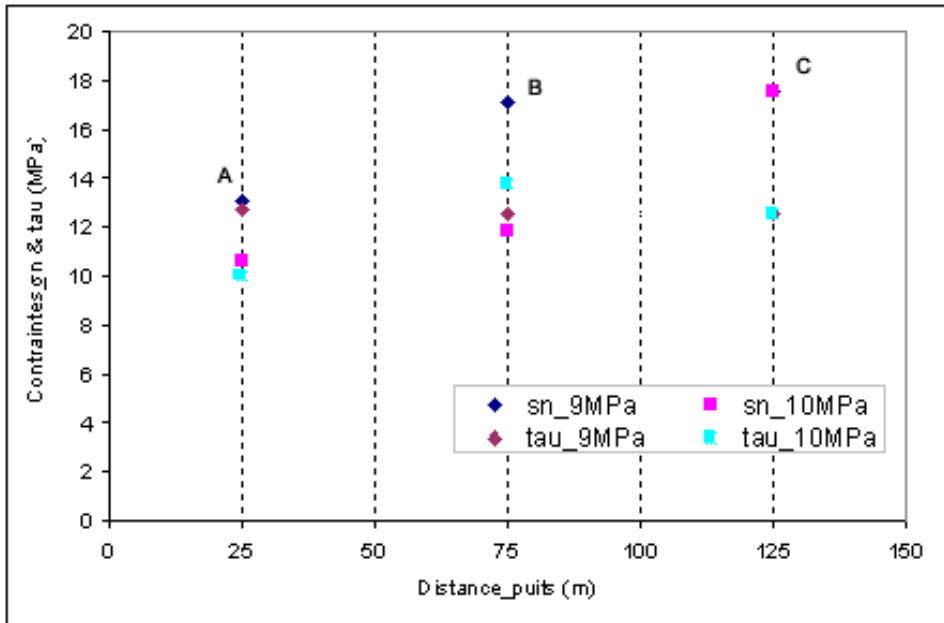
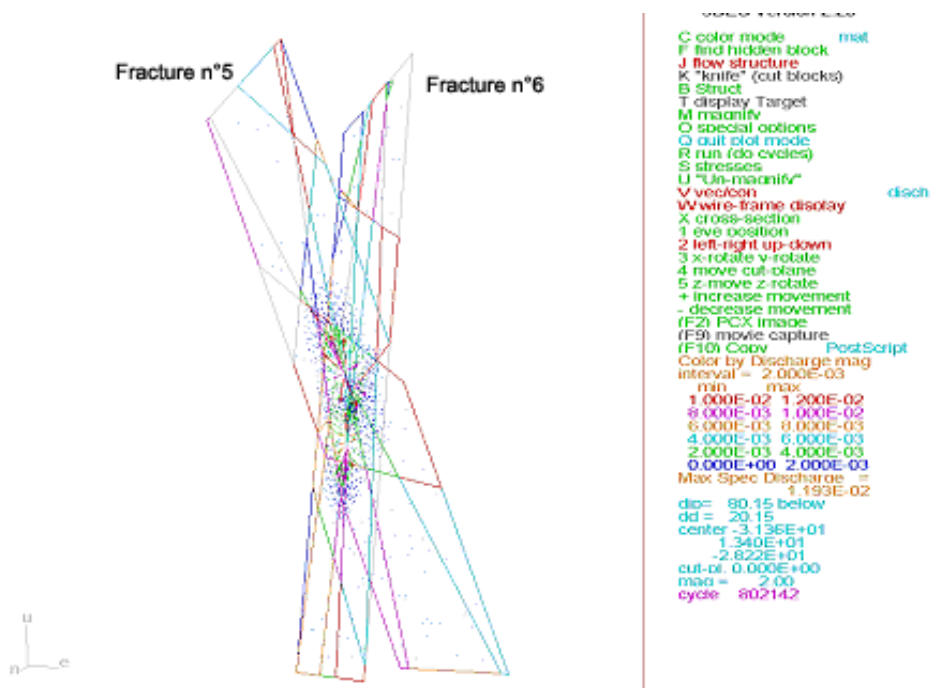


Fig. 4 - Ouvertures hydrauliques calculées pour la fracture n° 5 pendant le palier de 10 MPa (modèle 4).



**Fig. 5 - Variation des contraintes normales et tangentiels dans le plan de la fracture n° 5 à des distances de 25 m, 75 m et 125 m du puits (modèle 4).**

L'augmentation de 1 MPa de la pression dans le puits, soit une surpression totale de 11 MPa, provoque une ouverture de la fracture n° 6 sur un rayon d'environ 100 m et absorbant à elle seule un débit d'environ 11 l/s (fig. 6). Les débits entrants dans la fracture n° 5 augmentent également et atteignent près de 12 l/s correspondant à une propagation de l'ouverture hydraulique maximale sur plus de 120 m du puits (fig. 7).



**Fig. 6 - Répartition des débits injectés correspondant à une surpression dans le puits de 11 MPa (modèle 4).**

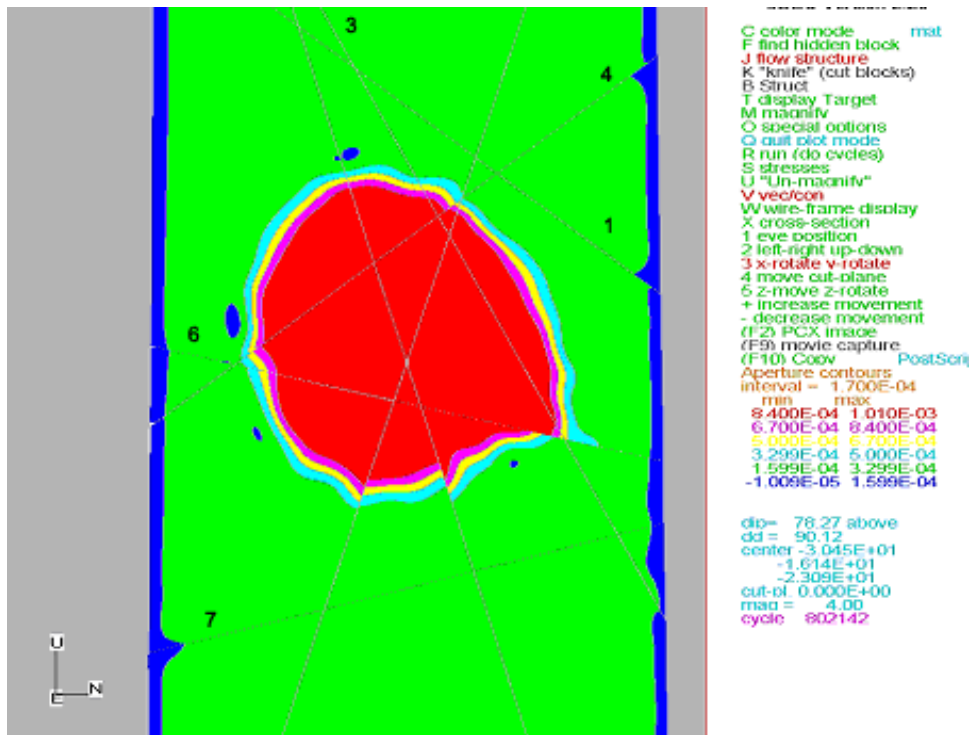


Fig. 7 - Ouvertures hydrauliques calculées pour la fracture n° 5 pendant le palier de 11 MPa (modèle 4).

Pour le palier de pression à 12 MPa, les ouvertures hydrauliques des fractures n° 4 et n° 7 ont été mobilisées permettant l'injection des fluides à des débits dépassant les 12 l/s (fig. 8). Les déplacements normaux maximaux ont atteint près de 2,5 mm (fig. 9).

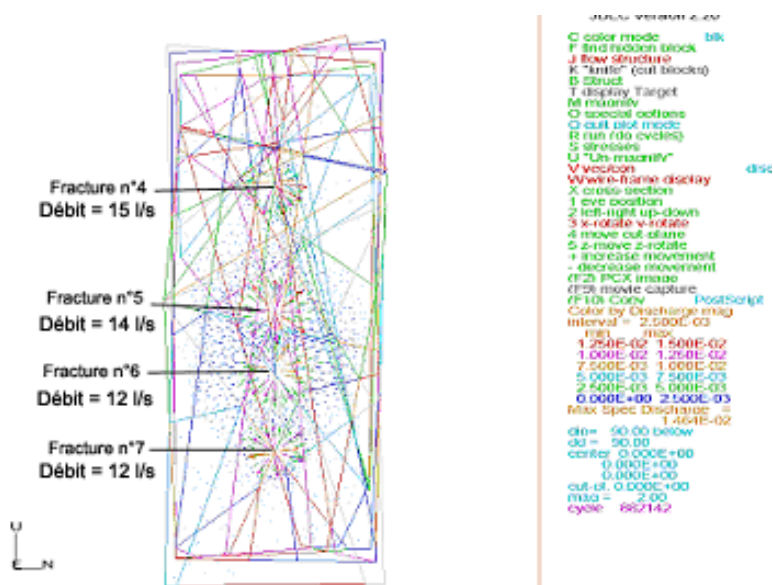
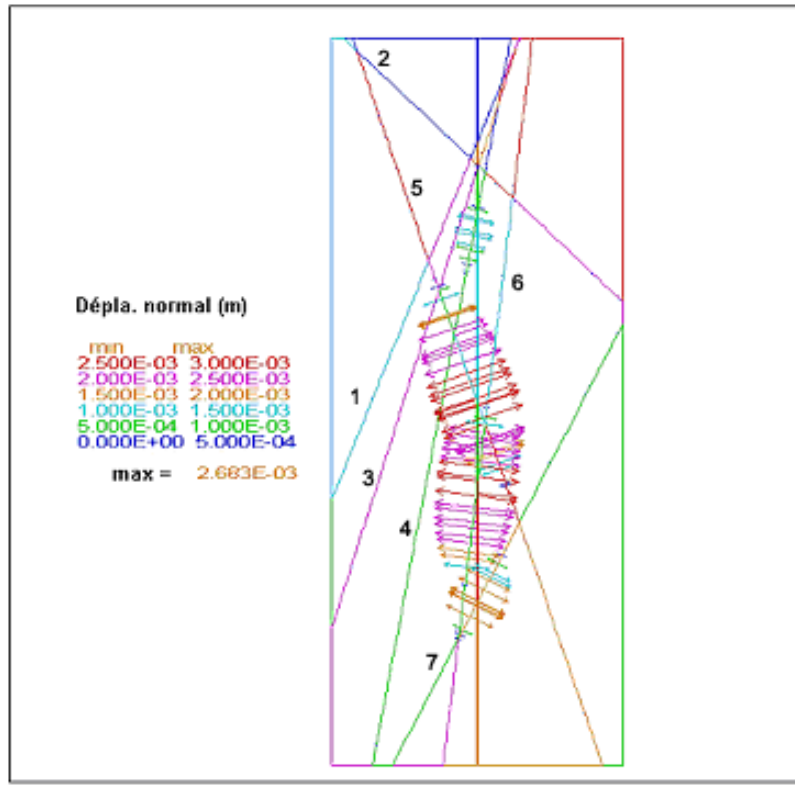


Fig. 8 - Répartition des débits injectés correspondant à une surpression dans le puits de 12 MPa (modèle 4).



**Fig. 9 - Déplacements normaux des fractures calculés sur un profil vertical passant par le puits après le palier de 12 MPa (modèle 4).**

En conclusion, on peut dire que l'introduction d'une loi à raideur variable dans le modèle améliore qualitativement le comportement hydraulique simulé. Cependant, cette loi n'a pas été suffisante à l'obtention d'une ouverture significative des fractures pour des valeurs de surpressions voisines de 6 MPa comme le montrent les essais de stimulations réalisées dans le forage GPK1 en 1993.

## 1.2. RÉDUCTION DE L'ANGLE DE FROTTEMENT : MODÈLE 5

Dans ce modèle, l'angle de frottement initial a été légèrement diminué en réduisant sa valeur de 50° à 45°. L'ensemble des paramètres hydromécaniques retenus dans les calculs qui vont être présentés sont regroupés dans le tableau 2 ci-dessous.

	$K_{n,min}$ (Mpa/m)	$K_{n,max}$ (Mpa/m)	$K_{s,min}$ (Mpa/m)	$K_{s,max}$ (Mpa/m)	Frot. Initial	Frot. Résid	Rugosité	$a_{res}$	$a_0$	$a_{max}$
Fract.	80 000	150 000	80 000	150 000	45°	35°	10 mm	$10^{-8}m$	$6 \cdot 10^{-7}m$	$10^{-3}m$

**Tabl. 2 - Paramètres hydromécaniques des fractures du modèle 5.**

Les calculs ont été menés suivant le même principe décrit précédemment et ils ont donné lieu aux résultats suivants :

- un débit d'injections de près de 4 l/s est obtenu dès le palier de 8 MPa, alors qu'il n'était que d'environ 2 l/s pour le modèle 4 précédent (fig. 10) ;
- les fractures n° 4, n° 5, n° 6 et n° 7 ont été les plus stimulées favorisant l'injection des fluides avec un débit total d'environ 62 l/s lors du dernier palier de pression de 12 Mpa (fig. 11). À titre de comparaison avec le modèle précédent, la déformation mécanique maximale calculée dans la direction normale aux plans des fractures à cette étape est d'environ 1,9 mm, et elle est associée à un déplacement en cisaillement d'environ 2,9 cm (fig. 12). L'ouverture hydraulique maximale (1 mm) est atteinte sur un rayon moyen d'environ 60 m pour la fracture n° 4, 130 m pour les deux fractures n° 5 et n° 6 et 100 m pour la fracture n° 7.

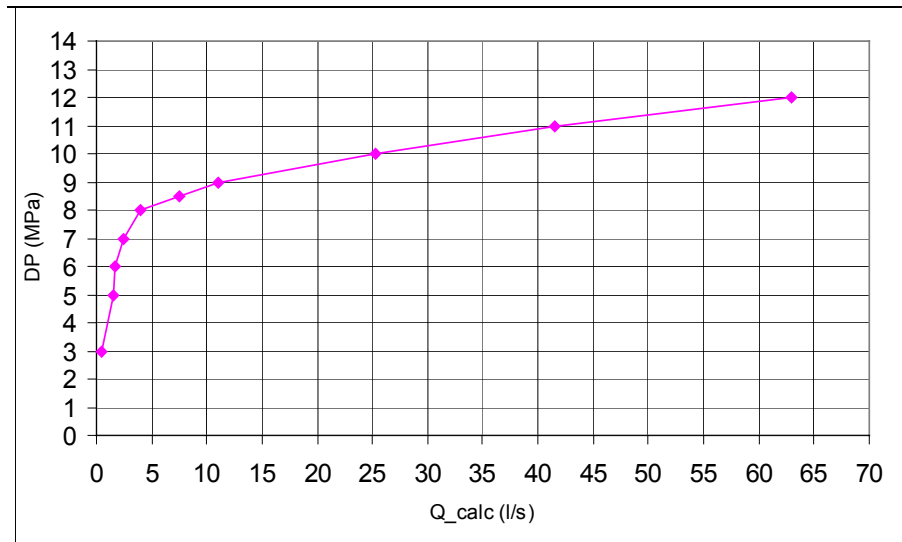


Fig. 10 - Courbe pression-débit calculée pour le modèle 5.

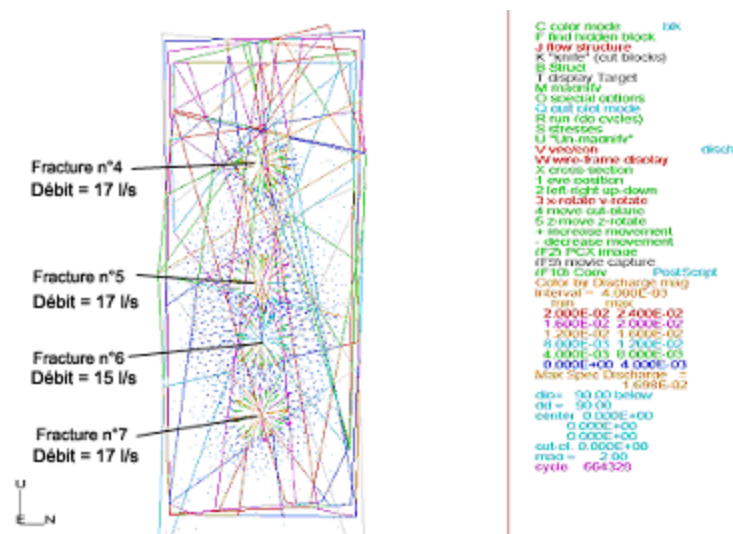
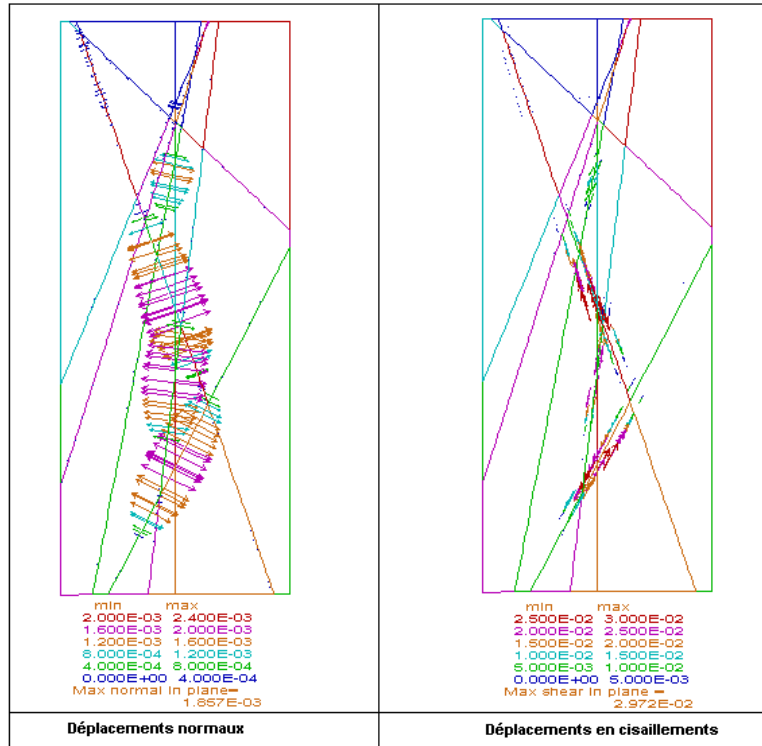


Fig. 11 - Répartition des débits injectés correspondant à une surpression dans le puits de 12 MPa (modèle 5).



**Fig. 12 - Déformations mécaniques normales et en cisaillements calculées par le modèle au palier de 12 MPa (modèle 5).**

En conclusion, si la réduction de l'angle de frottement améliore la réponse dans la première partie de la courbe pression-débit, au-delà d'une surpression de 9 MPa, les débits deviennent beaucoup plus grands que pour le modèle précédent à surpression égale dans le puits.

Comme dans les simulations précédentes, la partie haute de la zone stimulée (zone de la fracture n° 1) ne réagit pas aux stimulations hydrauliques.

## 2. Modification de l'orientation de la zone 1

Pour tenter d'améliorer le comportement simulé de manière quantitative, les orientations de certaines fractures ont été légèrement modifiées dans un sens plus favorable à la direction de la contrainte maximale horizontale.

Dans ce modèle, seule la direction de pendage de la fracture n° 1 a été changée. Elle a été supposée dans ce cas égale à 283 °E au lieu de 297 °E, valeur prise en compte jusqu'à présent dans le modèle.

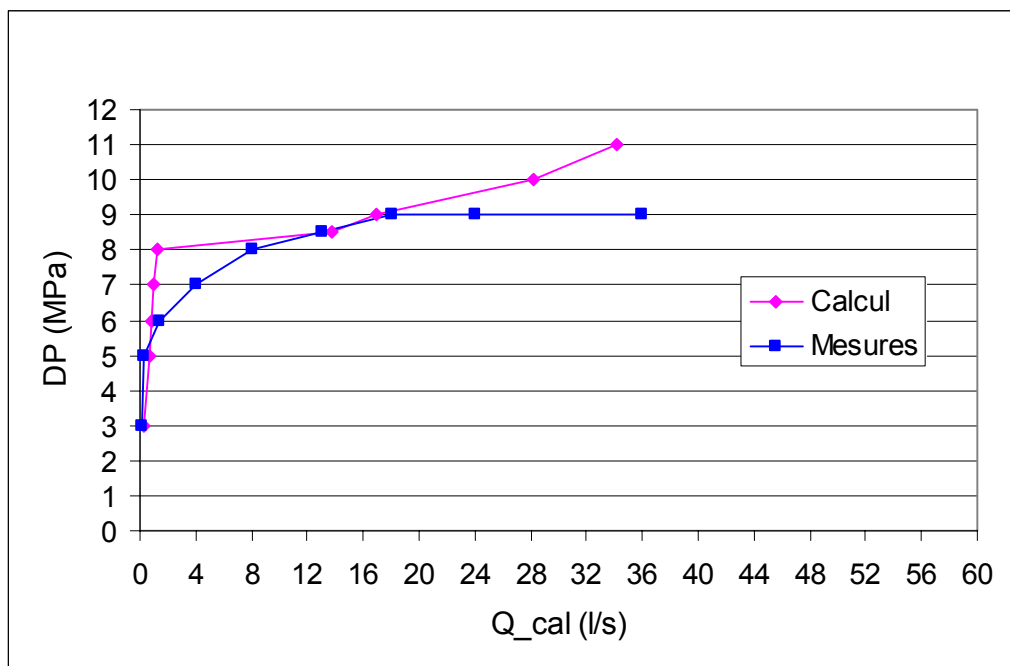
### 2.1. AUGMENTATION DE LA RIGIDITÉ DES FRACTURES : MODÈLE 6

Les valeurs des raideurs maximales ( $k_n$ , max., et  $k_s$ , max.) ont été augmentées de 150 000 MPa/m à 180 000 MPa/m ainsi que l'angle de frottement initial qui est ramené de 45° à 50° (tabl. 3), ce qui signifie physiquement une augmentation de la rigidité globale initiale du massif.

	$K_{n,min}$ (MPa/m)	$K_{n,max}$ (MPa/m)	$K_{s,min}$ (MPa/m)	$K_{s,max}$ (MPa/m)	Frot. Initial	Frot. Résid	Rugosité	$a_{res}$	$a_0$	$a_{max}$
Modèle 6	80 000	180 000	80 000	180 000	50°	35°	10 mm	$10^{-8}m$	$6 \cdot 10^{-7}m$	$10^{-3}m$

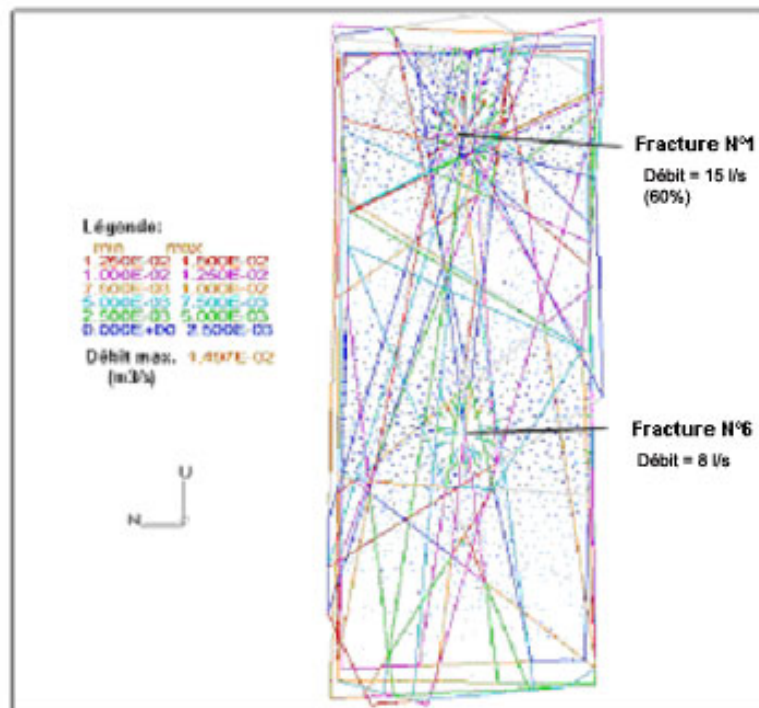
**Tabl. 3 - Propriétés hydromécaniques retenues pour le modèle 6.**

La courbe pression-débit obtenue est présentée à la figure 13. L'augmentation de la rigidité initiale est très nette dans la première partie de la courbe.



**Fig. 13 - Courbe pression-débit (modèle 6).**

L'essentiel du fluide injecté passe du puits vers l'échangeur au niveau de la fracture n° 1 avec un débit de près de 15 l/s, soit plus de 60 % du volume total injecté (fig. 14). Une seconde zone perméable apparaît également à ce stade (pression d'injection égale à 11 MPa) au niveau de la fracture n° 6 où le débit injecté est inférieur à 7 l/s. Il faut noter qu'à ce stade où la pression d'injection est de 11 MPa, l'augmentation des rigidités des fractures a eu comme effet de retarder la stimulation de la fracture profonde n° 7, contrairement à ce qui a été obtenu ci-dessus pour le cas de raideurs relativement plus faibles (fig. 15).



**Fig. 14 - Répartition des débits injectés correspondant à une surpression dans le puits de 11 MPa (modèle 6).**

En conclusion, le modèle semble montrer que la stimulation de la zone haute du puits GPK1, qui est par ailleurs observée sur le site, nécessite un réajustement des données structurales dans cette zone représentée dans le modèle par la fracture n° 1. Cependant, les propriétés hydromécaniques doivent être reconsidérées.

## 2.2. RETOUR AUX PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU MODÈLE 5 : MODÈLE 7

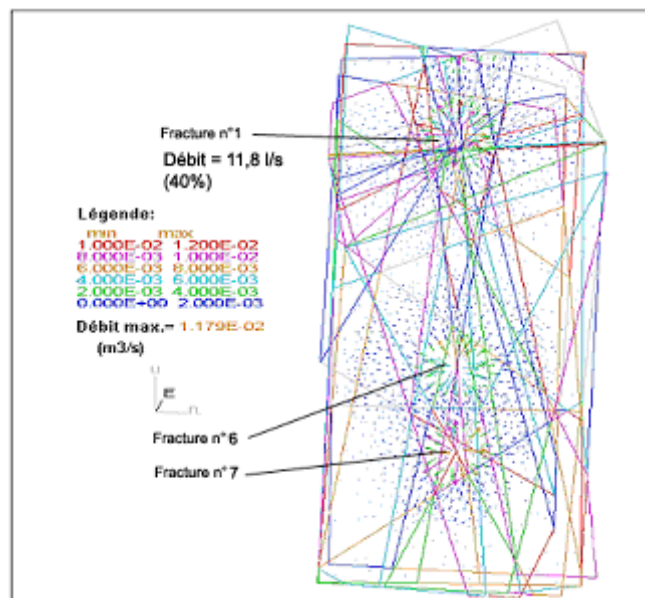
Dans ce modèle, comme dans le modèle précédent, seule la direction de pendage de la fracture n° 1 a été changée. Elle a été supposée dans ce cas égale à 283 °E au lieu de 297 °E, valeur prise en compte jusqu'à présent dans le modèle. Les paramètres hydromécaniques sont identiques à ceux du modèle 5. Les fractures alors sont moins rigides que pour le modèle précédent (modèle 6).

	$K_{n,min}$ (MPa/m)	$K_{n,max}$ (MPa/m)	$K_{s,min}$ (MPa/m)	$K_{s,max}$ (MPa/m)	Frot. Initial	Frot. Résid	Rugosité	$a_{res}$	$a_0$	$a_{max}$
Modèle 7	80 000	150 000	80 000	150 000	45°	35°	10 mm	$10^{-8}m$	$6 \cdot 10^{-7}m$	$10^{-3}m$

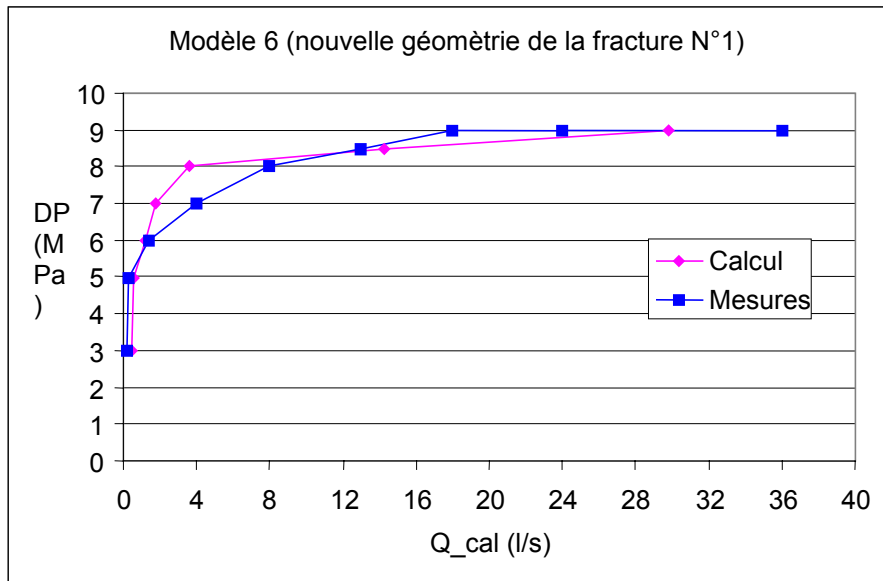
**Tabl. 11 - Propriétés hydromécaniques le modèle 7.**

Les calculs ont montré les résultats suivants :

- cette nouvelle orientation pour la fracture n° 1 a favorisé l'accès des fluides dans la partie haute du puits GPK1 au cours de la stimulation (fig. 15) ;
- de manière qualitative, le comportement hydraulique obtenu par les calculs est proche de celui qui a été mesuré (fig. 16). Cependant, au-delà du palier de surpression de 9 MPa, les mesures ont montré une nette augmentation de la perméabilité du réseau de fractures, puisque de forts débits peuvent être injectés sans quasiment aucune augmentation de la surpression en tête de puits. Ce phénomène ne peut pas être simulé par ce modèle car, dans ce dernier, les sollicitations sont induites de manière exclusive par les variations de pressions qui sont appliquées au niveau du puits afin de permettre le calcul des débits correspondants. Pour étudier ce phénomène de manière précise, il faudrait appliquer des débits comme conditions hydrauliques au niveau du puits, ce qui alors permettrait de calculer les pressions qui s'y développent. Mais, cette démarche semble présenter un moindre intérêt car elle nécessite au moins une définition précise de la géométrie des fractures perméables intersectées par le puits ainsi que les débits injectés à travers chacune d'entre elles pour chaque palier de pression ;



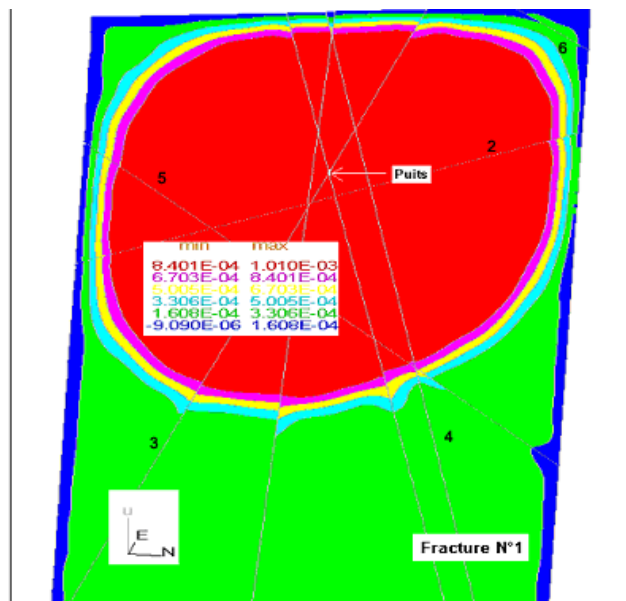
**Fig. 15 - Répartition des débits injectés correspondant à une surpression dans le puits de 9 MPa (modèle 7).**



**Fig. 16 - Comparaison entre les courbes pression-débit calculée et mesurée (modèle 7).**

- au palier de surpression de 9 MPa, l'ouverture hydraulique maximale (1 mm) est atteinte sur la quasi totalité du plan de la fracture n° 1 (fig. 17), permettant le passage du fluide vers l'échangeur avec un débit égal à environ 11,8 l/s, soit plus de 40 % du débit total injecté (fig. 18).

Notons que pour ce même palier de pression (*i.e.* 9 MPa), l'ouverture hydraulique maximale n'est pas encore atteinte dans certaines des fractures perméables, comme par exemple la fracture n° 5, où l'ouverture calculée est inférieure à 0,5 mm (fig. 19).



**Fig. 17 - Répartition des ouvertures hydrauliques calculées dans la fracture n° 1 au palier de 9 MPa (modèle 7).**

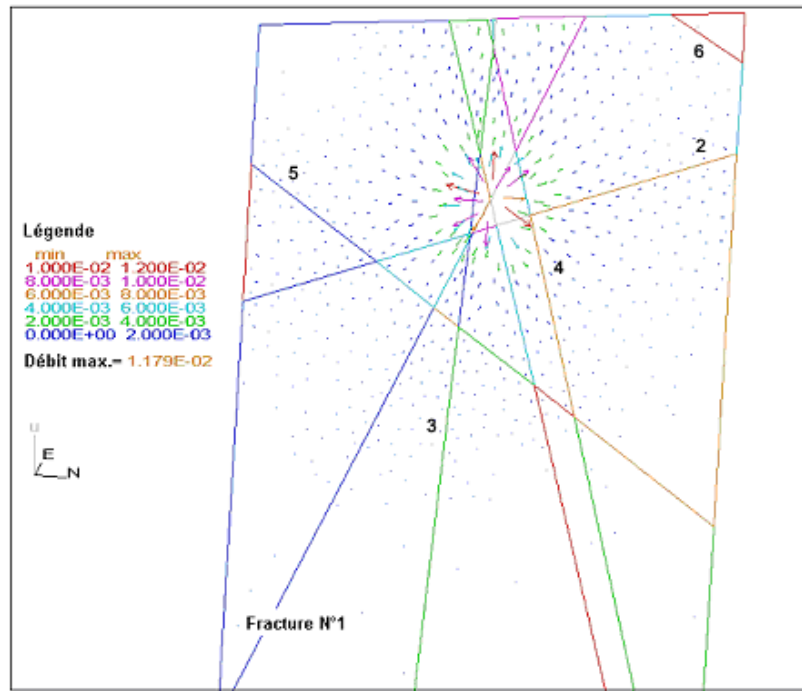


Fig. 18 - Répartition des débits calculés dans la fracture n° 1 au palier de 9 MPa (modèle 7).

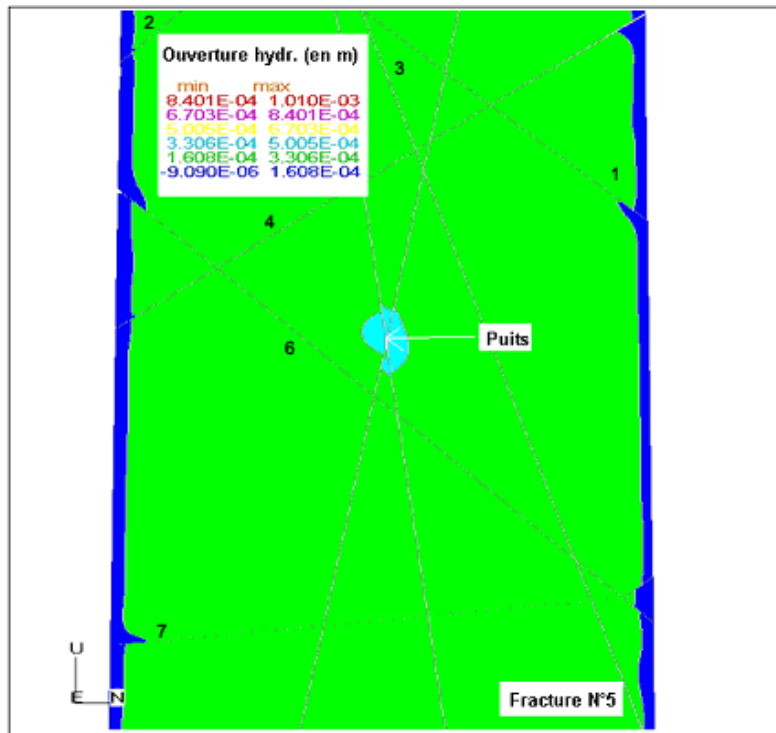
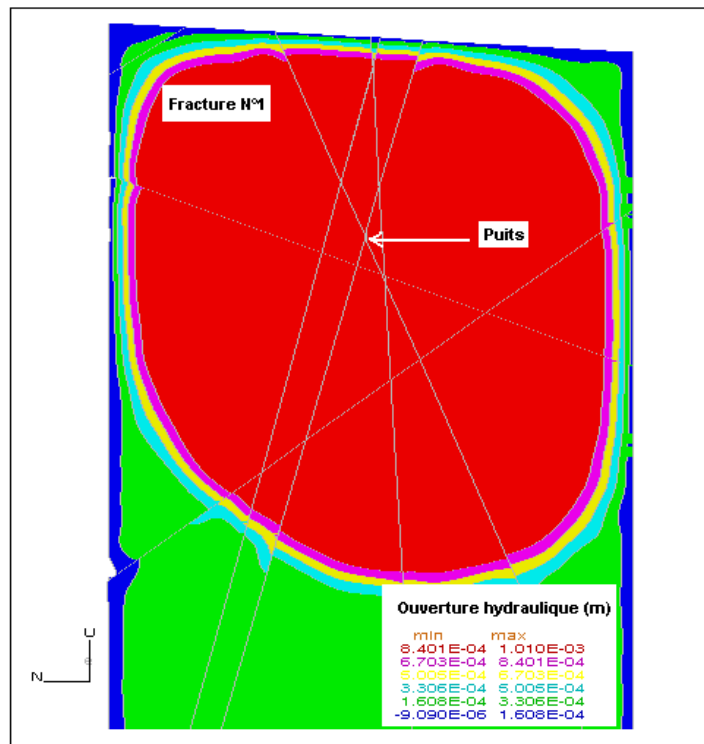


Fig. 19 - Répartition des ouvertures hydrauliques calculées dans la fracture n° 5 au palier de 9 MPa (modèle 7).

- au palier de surpression de 10 MPa, les débits injectés augmentent dans les trois fractures perméables (n° 1, n° 6 et n° 7) atteignant respectivement 14,16 l/s, 8,5 l/s et 12 l/s. Le débit total injecté dans le puits est d'environ 40 l/s ;
- pour un palier de 11 MPa, les débits injectés augmentent dans les trois fractures perméables (n° 1, n° 6 et n° 7) atteignant respectivement 16,5 l/s, 9,9 l/s et 13,65 l/s. Le débit total injecté dans le puits est d'environ 46,5 l/s. Il faut noter qu'à ce stade, la fracture n° 1 continue à s'ouvrir hydrauliquement vers sa partie profonde où l'ouverture hydraulique maximale (1 mm) s'est propagée à une distance du puits de plus de 220 m (fig. 18).



**Fig. 20 - Répartition des ouvertures hydrauliques calculées dans la fracture n° 1 au palier de 11 MPa (modèle 7).**

En effet, parmi les différentes hypothèses qui ont été étudiées pour tenter de mobiliser les ouvertures hydrauliques de la fracture n° 1, seule celle qui a consisté à réorienter cette dernière de manière favorable au champ des contraintes a permis d'atteindre cet objectif. Cette hypothèse importante a permis non seulement de reproduire correctement le comportement hydraulique observé, mais également de conforter l'existence d'une corrélation suffisamment forte entre l'orientation des contraintes naturelles principales et celle des fractures potentiellement conductrices. Cette étude témoigne également des difficultés rencontrées pendant la réalisation de l'essai de stimulation dans le forage GPK1, et illustre la complexité du contexte géologique dans lequel ces mesures s'étaient déroulées.

### 3. Ajout d'une zone de faille supplémentaire

Ce modèle reprend la géométrie des fractures définie initialement pour le forage GPK1, où en particulier la fracture n° 1 est représentée par une direction de pendage égale à 297 °E (cf. modèles 4 et 5). Rappelons que les différents modèles étudiés jusqu'à présent, prenant en compte cette géométrie de base, ont tous montré l'impossibilité de stimuler la zone haute du puits GPK1 (zone représentée par la fracture n° 1). L'objectif est ici d'étudier le comportement hydraulique en présence d'une zone de faille supplémentaire (notée F0) localisée à une quarantaine de mètres au-dessus de la fracture n° 1 (cf. ann. 4). En particulier, il s'agit de vérifier si la prise en compte de cette nouvelle fracture dans le modèle favoriserait l'accès du fluide à l'échangeur par la partie haute du forage. Cette faille supplémentaire (F0) coupe le forage GPK1 à la profondeur de 2 816 m avec un pendage de 72° et une direction de pendage égale à 229 °E. Il est important de noter que la fracture (F0) est localisée dans la zone du puits recouverte par le tubage et donc en dehors de la zone ouverte du puits (Openhole) soumise directement aux pressions des fluides injectés pendant l'essai de stimulation.

Le modèle a été mis en œuvre dans ce cas pour évaluer l'hypothèse suivante selon laquelle le flux injecté dans la fracture n° 1 pourrait éventuellement augmenter lorsque cette dernière est intersectée par une fracture plus favorable aux écoulements, en l'occurrence par la fracture (F0). Dans le modèle, une condition de flux nul a été appliquée au niveau de la fracture (F0) car, conformément aux observations réalisées sur le site, aucun débit n'a été enregistré dans cette fracture pendant l'essai de stimulation de la partie ouverte du puits. La suite des calculs a été réalisée suivant la même démarche que celle qui a été mise en œuvre pour les autres modèles précédents.

#### 3.1. CAS INITIAL : MODÈLE 8

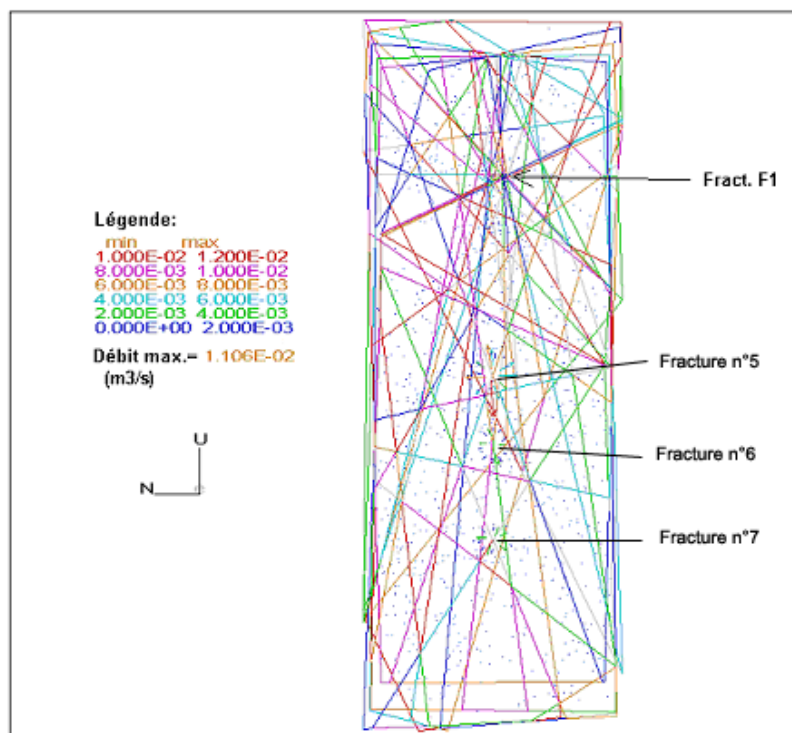
Les paramètres hydromécaniques des fractures sont ceux utilisés pour le modèle 6 correspondant aux valeurs maximales des raideurs maximales et à un angle de frottement initial de 50° (tabl. 5).

	$K_{n,min}$ (MPa/m)	$K_{n,max}$ (MPa/m)	$K_{s,min}$ (MPa/m)	$K_{s,max}$ (MPa/m)	Frot. Initial	Frot. Résid	Rugosité	$a_{res}$	$a_0$	$a_{max}$
Modèle 8	80 000	180 000	80 000	180 000	50°	35°	10 mm	$10^{-8}m$	$6 \cdot 10^{-7}m$	$10^{-3}m$

**Tabl.12 - Propriétés hydromécaniques correspondant au modèle 8.**

En résumé, les calculs ont abouti aux premiers résultats suivants :

La prise en compte de la nouvelle fracture (F0) n'a pas modifié le comportement hydraulique dans la partie haute du puits, puisque la fracture n° 1 n'a pas connu une augmentation significative de sa perméabilité (fig. 21). En effet, une surpression de 11 MPa appliquée dans le puits n'a pas été suffisante pour augmenter de manière significative la perméabilité de la fracture n° 1.



**Fig. 21 - Répartition des débits injectés correspondant à une surpression dans le puits de 11 MPa (modèle 8).**

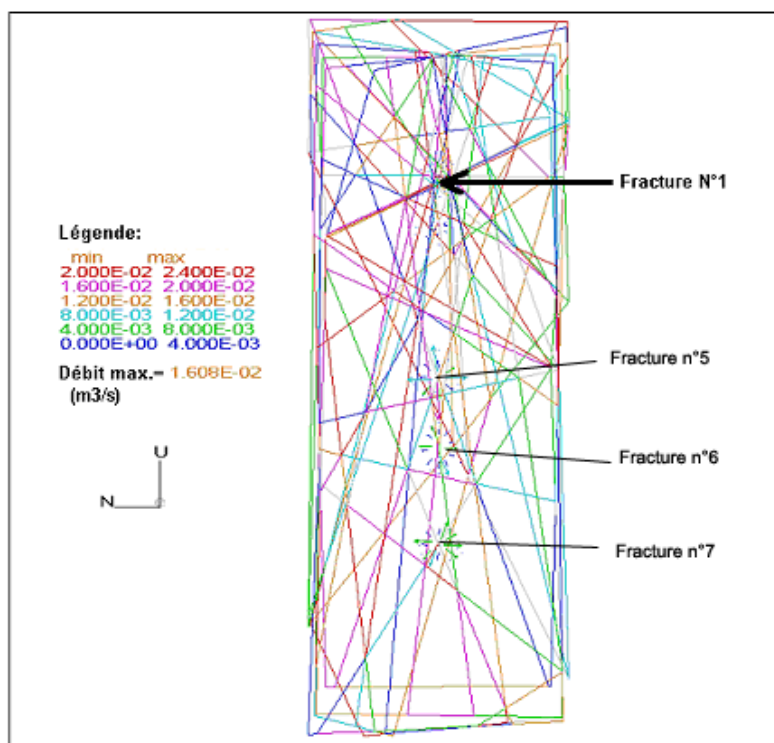
### 3.2. AUGMENTATION DE LA PERMÉABILITÉ DE LA FAILLE SUPPLÉMENTAIRE : MODÈLE 9

Le même modèle a été repris en attribuant à la nouvelle fracture (F0) des paramètres hydromécaniques de manière à favoriser sa perméabilité hydraulique. En effet, l'angle de frottement initial a été supposé égal à 40° au lieu de 50°, diminuant ainsi la résistance aux contraintes de cisaillements supportées par la fracture (F0). Les paramètres hydrauliques ont été augmentés en admettant une ouverture initiale égale à 0,5 mm, une ouverture résiduelle de 0,1 mm et une ouverture maximale de 2 mm (tabl. 6).

	$K_{n,min}$ (MPa/m)	$K_{n,max}$ (MPa/m)	$K_{s,min}$ (MPa/m)	$K_{s,max}$ (MPa/m)	Frot. Initial	Frot. Résid	Rugosité	$a_{res}$	$a_0$	$a_{max}$
Modèle 9	80 000	180 000	80 000	180 000	50°	35°	10 mm	10 <sup>-8</sup> m	6 10 <sup>-7</sup> m	10 <sup>-3</sup> m
Modèle 9 (F0)	80 000	180 000	80 000	180 000	40°	35°	10 mm	10 <sup>-4</sup> m	5 10 <sup>-4</sup> m	2 10 <sup>-3</sup> m

**Tabl. 11 - Propriétés hydromécaniques correspondant au modèle 9.**

La mise en œuvre du modèle n'a pas donné lieu à des résultats notablement différents de ceux présentés ci-dessus (modèle 8), puisque la zone de la fracture n° 1 n'a pas réagi de manière favorable à la stimulation (fig. 22). L'intersection de la fracture n° 1 avec une fracture perméable voisine, en l'occurrence de la fracture (F0), ne suffit pas à favoriser l'accès du fluide par l'intermédiaire de la fracture n° 1.



**Fig. 22 - Répartition des débits injectés correspondant à une surpression dans le puits de 11 MPa (modèle 9).**

### 3.3. MODIFICATION DE L'ORIENTATION DE LA ZONE DE FAILLE N° 1 : MODÈLE 10

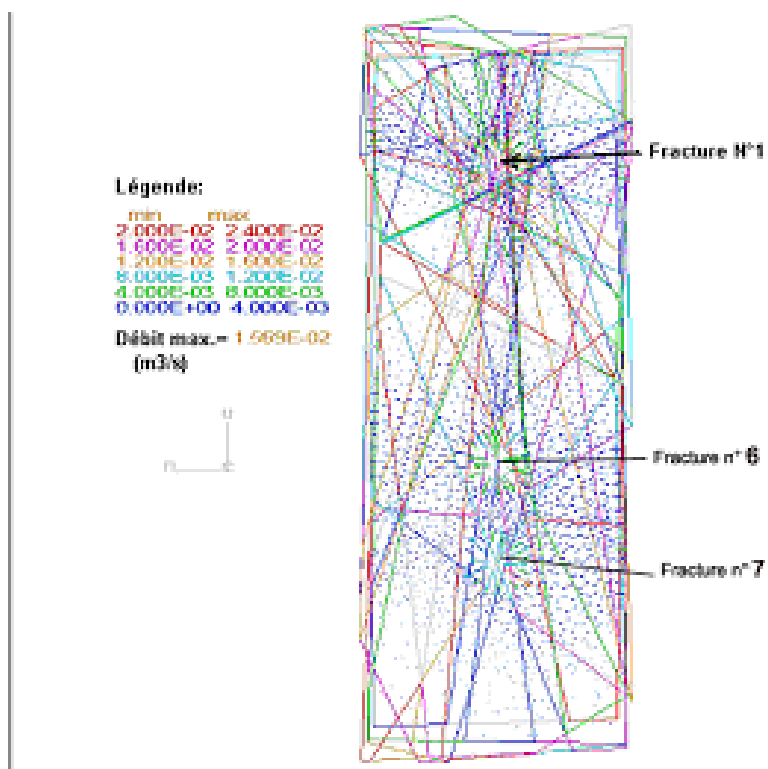
Le même modèle a été évalué dans l'hypothèse où l'orientation de la fracture n° 1 est ramenée à la valeur de 283° pour laquelle la stimulation de la zone haute du forage a été démontrée dans les calculs précédents (modèles 6 et 7). Les propriétés hydromécaniques des fractures sont celles introduites dans le modèle précédent (tabl. 6).

Les résultats des calculs sont cohérents avec ceux obtenus précédemment (modèles 6 et 7) puisque, la fracture n° 1 a pu être aussi dans ce cas, effectivement stimulée (fig. 23).

### 3.4. CONCLUSION

À ce stade de l'étude, les résultats qui viennent d'être présentés pour le modèle avec une fracture supplémentaire localisée à quelques dizaines de mètres au-dessus de la zone perméable proche de la fracture n° 1, aboutissent aux conclusions suivantes :

- soit la zone haute du forage GPK1 (représentée par la fracture n° 1) est dotée d'une forte perméabilité naturelle avant toute stimulation hydraulique, ce qui expliquerait sa forte participation aux écoulements ;
- soit elle n'est pas initialement fortement perméable, et dans ce cas elle serait orientée favorablement aux contraintes principales, ce que démontre le modèle.



**Fig. 23 - Répartition des débits injectés correspondant à une surpression dans le puits de 11 MPa (modèle 10).**

## **ANNEXE 8**

# **Modélisation de la stimulation du forage GPK2**

A. Hosni, S. Gentier (CDG/ENE)



## 1. Démarche de modélisation

Cette annexe est consacrée à l'étude du comportement hydraulique obtenu pendant l'essai de stimulation réalisé en juin 1995 dans le forage GPK2. Les pressions d'injection dans le forage ainsi que les débits associés ont été enregistrés tout au long de l'essai. Les principales zones d'accès des fluides du forage vers l'échangeur ont été déterminées grâce aux logs de débitmétrie réalisés à cette occasion. L'analyse de l'ensemble de ces données expérimentales, ainsi que la compréhension des mécanismes qui se mettent en place, s'appuieront principalement sur la modélisation numérique comme il a été le cas pour le forage GPK1. Le scénario selon lequel ont été menés les calculs est exactement identique à celui qui a été utilisé pour l'étude de GPK1. En effet, après avoir établi l'état de référence correspondant à la mise en œuvre des conditions initiales et aux limites hydromécaniques dans le modèle, des pressions d'injections ont été appliquées progressivement dans le puits (en plusieurs paliers) afin de calculer les débits injectés correspondants.

Cependant, la démarche adoptée pour l'étude de GPK2 diffère légèrement de celle qui a été adoptée pour GPK1. En effet, la mise au point d'un jeu de paramètres hydromécaniques fait partie des résultats importants obtenus par le modèle au cours de l'étude de l'essai de stimulation de GPK1. Ces paramètres ont été pris en compte dans le modèle consacré au forage GPK2 afin de tester leur domaine de validité. Ainsi, à ce stade, la modélisation de l'essai de stimulation de GPK2 s'inscrit d'avantage dans une démarche prédictive du comportement hydraulique mesuré, et non pas celle d'un calage de ce dernier comme cela a été réalisé pour GPK1. Par conséquent, le modèle a été d'abord utilisé pour évaluer le comportement hydraulique obtenu dans GPK2 en se basant sur une comparaison entre les courbes (pression-débit) calculée et mesurée, ainsi que sur les données des logs de débitmétrie.

## 2. Définition du modèle

Initialement, huit zones majeures fracturées naturellement ont été localisées et caractérisées géométriquement dans la partie stimulée du forage GPK2 (Genter *et al.*, 2002. Tenzer *et al.*, 1998), c'est-à-dire pour des profondeurs comprises entre 3 240 m et 3 570 m (tabl. 1).

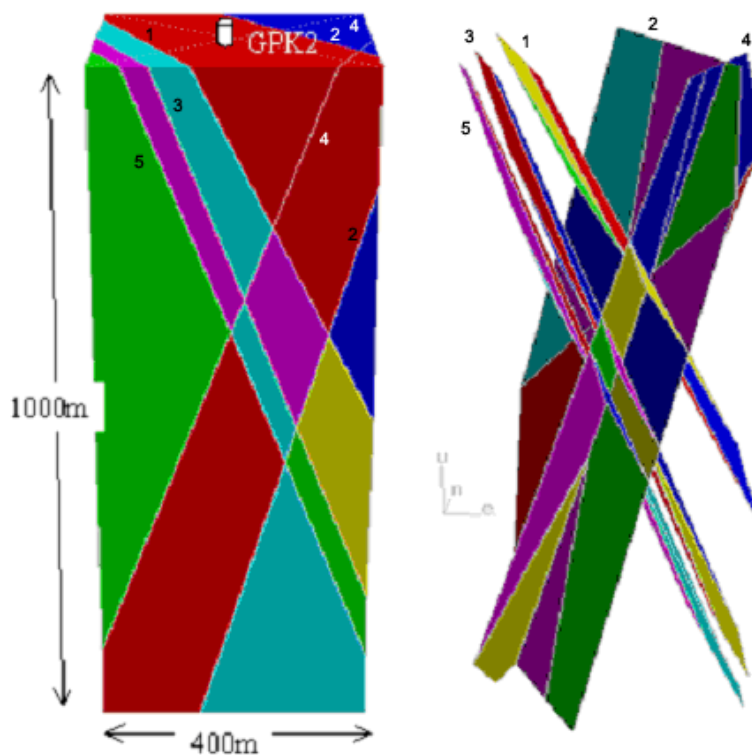
Zones	Profondeur (m)	Dir. Pendage (°)	Pendage (°)	Participation aux écoulements	Fractures retenues dans le modèle
Z1	3 247	68	58 - >65	25 %	Oui (F1)
Z2	3 259	74	72	-	Non
Z3	3 350	236	87	25 %	Oui (F2)
Z4	3 371	238	73	10 %	Non
Z5	3 470	60	79	25 %	Oui (F3)
Z6-a	3 480	276	84	-	Non
Z6-b	3 500	288	82	10 %	Oui (F4)
Z6-c	3 566	68	81	5 %	Oui (F5)

**Tabl. 1 - Paramètres géométriques des fractures majeures rencontrées dans le forage GPK2.**

Les premières analyses effectuées sur la base des logs de débitmétrie ont montré que 75 % du volume injecté dans le forage GPK2 accède à l'échangeur au niveau des trois zones Z1, Z3 et Z5 (Tenzer *et al.*, 1998). Par conséquent, ces trois zones ont été retenues par la suite dans le modèle. La prise en compte de l'ensemble des zones dans le modèle a généré des difficultés numériques au moment de sa discrétisation en éléments de calcul (les mailles de calcul). Pour écarter ces difficultés, seulement deux zones supplémentaires, il s'agit en l'occurrence des zones Z6-b et Z6-c, ont pu être introduites dans le modèle.

Un modèle de dimensions 400 m\*400 m\*1 000 m, centré sur le puits GPK2, a été construit sur la base des cinq fractures majeures F1, F2, F3, F4 et F5 présentées dans le tableau 1 ci-dessus (fig. 1).

Rappelons que les contraintes initiales sont celles qui ont été mesurées sur le site de Soultz-sous-Forêts (Klee et Rummel, 1993), auxquelles a été associé un champ de pression hydrostatique. Les conditions aux limites mécaniques sont de type déplacements nuls imposés aux frontières externes du modèle. Des pressions hydrostatiques ont été également imposées comme conditions aux limites hydrauliques. Enfin, la pression a été augmentée progressivement dans le puits (en plusieurs paliers) afin de simuler l'essai d'injection.



**Fig. 1 - Géométrie du modèle et du réseau de fractures (puits GPK2).**

### 3. Résultats du modèle 1

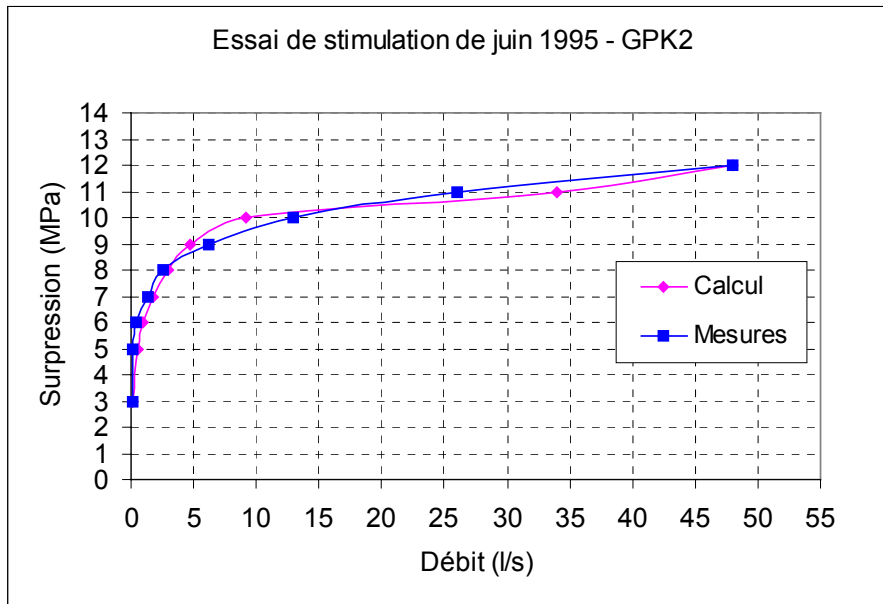
Les paramètres hydromécaniques mis en œuvre dans le modèle pour simuler le comportement des fractures sont résumés dans le tableau ci-dessous (tabl. 2).

	$K_{n,min}$ (Mpa/m)	$K_{n,max}$ (Mpa/m)	$K_{s,min}$ (Mpa/m)	$K_{s,max}$ (Mpa/m)	Frot. Initial	Frot. Résid	Rugosité	$a_{res}$	$a_0$	$a_{max}$
Fract.	80 000	180 000	80 000	180 000	50°	35°	10 mm	$10^{-8}m$	$6 \cdot 10^{-7}m$	$10^{-3}m$

**Tabl. 2 - Paramètres hydromécaniques des fractures.**

Les principaux résultats du modèle sont les suivants :

Premièrement, le comportement hydraulique global qui est obtenu à la fin de la simulation a montré une cohérence significative entre les calculs et les mesures (fig. 2). En effet, les débits calculés et mesurés pendant l'essai de stimulation sont qualitativement et quantitativement assez proches.

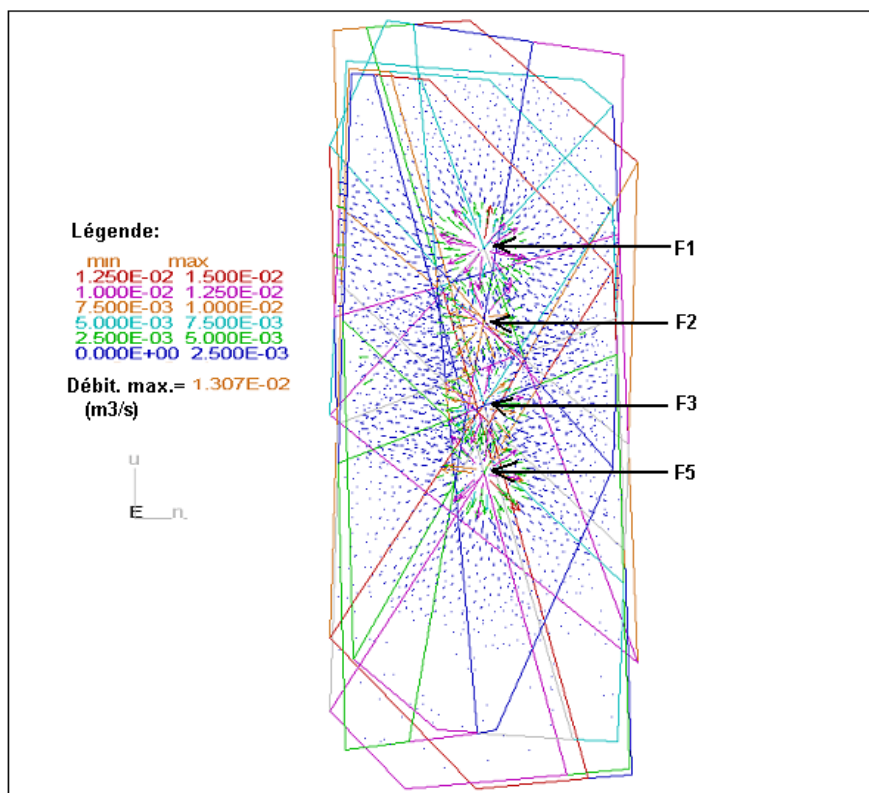


**Fig. 2 - Comparaison entre les courbes pression-débit mesurée et simulée (essai de stimulation de GPK2 - 1995).**

L'accès des fluides du puits vers l'échangeur s'effectue au niveau des quatre fractures F1, F2, F3 et F5 avec une répartition en pourcentage de volume injecté respectivement égale à environ 28 %, 22 %, 22 % et 28 % (fig. 3). Il faut noter que le modèle a montré une participation plus forte de la zone profonde représentée par la fracture F5 par

rapport à celle qui lui est attribuée d'après l'analyse des logs de débitmétrie (environ 10 %). Ce résultat du modèle n'est pas surprenant car l'orientation de la fracture F5 dans le modèle est quasi-parallèle à la contrainte horizontale maximale  $\sigma_H$  ( $10^\circ$  par rapport à  $\sigma_H$ ), ce qui favoriserait son ouverture. Par ailleurs, ceci expliquerait probablement la faible participation de la fracture (F4) aux écoulements à cause de son orientation légèrement moins favorable par rapport à celle du champ des contraintes principales ( $28^\circ$  par rapport à  $\sigma_H$ ).

Mis à part la fracture (F4) qui n'a pas montré une ouverture hydraulique significative à l'issue de la simulation pour les raisons qui viennent d'être évoquées (fig. 4), toutes les autres fractures ont connu une augmentation significative de leur perméabilité (fig. 5).



**Fig. 3 - Répartition des débits injectés correspondant à une surpression dans le puits de 12 MPa (GPK2).**

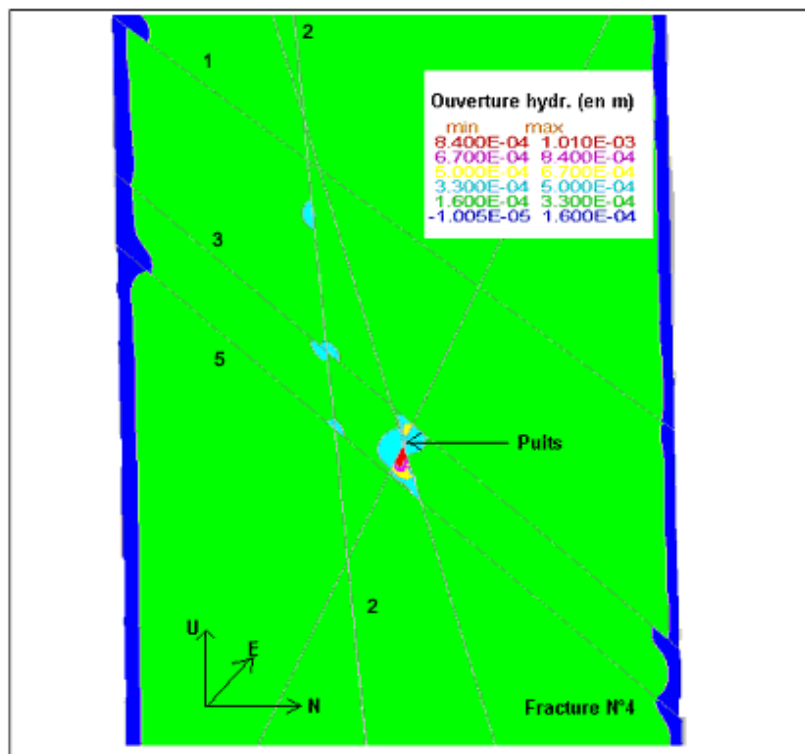


Fig. 4 - Répartition des ouvertures hydrauliques dans le plan de la fracture (F4) (modèle GPK2).

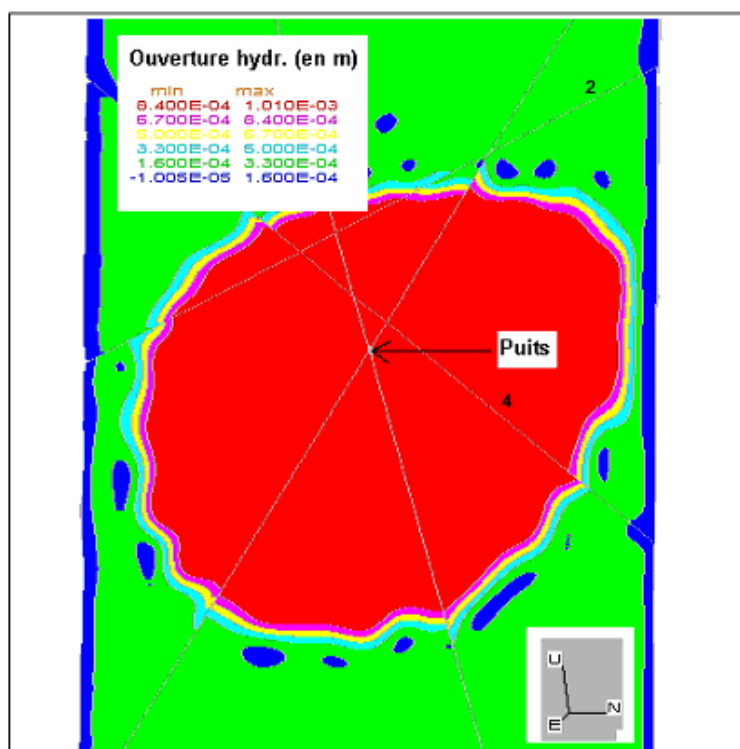


Fig. 5 - Répartition des ouvertures hydrauliques dans le plan de la fracture (F5) (modèle GPK2).

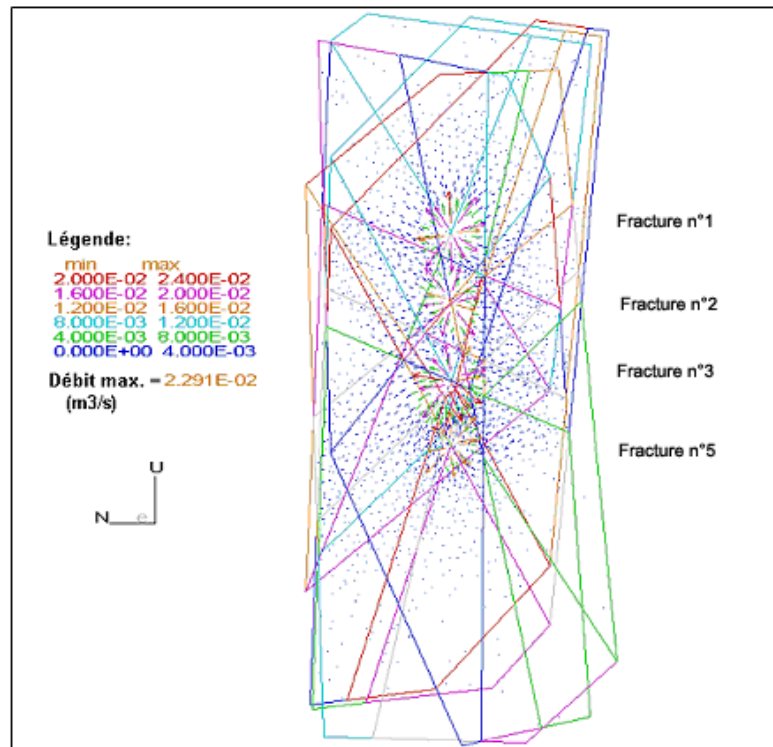
## 4. Résultats du modèle 2

La sensibilité des résultats du modèle aux variations de certains paramètres mécaniques des fractures a été étudiée. Ainsi, le comportement du modèle s'écarte de manière significative de celui qui a été établi par les mesures lorsqu'on diminue de 5° l'angle de frottement initial, soit 45° au lieu de 50°, et que les raideurs maximales sont ramenées à 150 000 MPa au lieu de 180 000 MPa (tabl. 3).

	$K_{n,min}$ (Mpa/m)	$K_{n,max}$ (Mpa/m)	$K_{s,min}$ (Mpa/m)	$K_{s,max}$ (Mpa/m)	Frot. Initial	Frot. Résid	Rugosité	$a_{res}$	$a_0$	$a_{max}$
Fract.	80 000	150 000	80 000	150 000	45°	35°	10mm	$10^{-8}m$	$6 \cdot 10^{-7}m$	$10^{-3}m$

**Tabl. 12 - Propriétés hydromécaniques retenues pour le modèle 2.**

En effet, les débits calculés s'écartent nettement de ceux qui ont été mesurés ou calculés par le modèle précédent (fig. 6). Ce résultat semblerait plus ou moins prévisible car la réduction de ces deux paramètres favorise les déformations normales et tangentielles des fractures et par conséquent, leurs ouvertures hydrauliques.



**Fig. 6 - Répartition des débits injectés correspondant à une surpression dans le puits de 12 MPa pour un angle de frottement de 45° et des raideurs maximales de 150 000 MPa (GPK2).**

## 5. Conclusion

Les résultats, obtenus dans le cadre de l'étude de l'essai de stimulation réalisé dans le forage GPK2 en juin 1995, ont illustré les capacités du modèle à reproduire qualitativement et quantitativement les mesures *in situ*. L'étude de sensibilité menée sur certains paramètres mécaniques qui régissent le comportement des fractures (angle de frottement initial, raideurs) a pu souligner la pertinence du jeu de paramètres qui a été mis au point au cours de l'étude du forage GPK1. Elle a également mis en évidence la sensibilité du modèle vis-à-vis des paramètres mécaniques qui régissent le comportement des fractures.

De manière générale, les différents calculs réalisés ont démontré l'existence d'une corrélation significative entre l'orientation des contraintes principales naturelles et celle des fractures stimulées. Par conséquent, la fiabilité des résultats obtenus par le modèle est pour l'essentiel tributaire de la qualité des données disponibles sur le site de Soultz-sous-Forêts, et de leurs précisions. Ainsi, comme on a pu le tester précédemment à travers l'étude de certaines configurations géométriques, le comportement hydraulique simulé dépend énormément de la qualité des données structurales qui sont prises en compte dans le modèle. L'efficacité du modèle et la fiabilité de ses résultats, lorsque ce dernier est mis en œuvre dans un objectif de prédiction du comportement, sont largement dépendantes de la précision des informations recueillies sur le site.

## **ANNEXE 9**

# **Modélisation hydromécanique des tests d'injection post stimulation dans GPK2**

A. Hosni, S. Gentier (CDG/ENE)



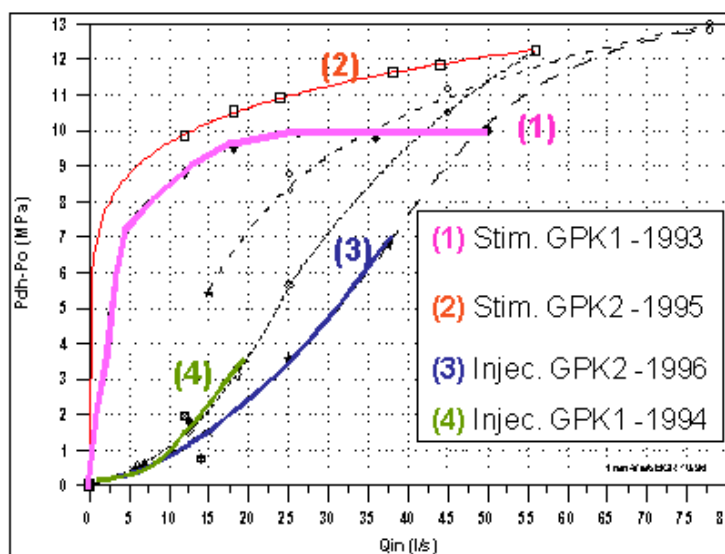
# 1. Présentation du modèle

Les travaux précédents ont abouti à la modélisation de l'essai de stimulation conduit en 1995 dans le forage GPK2 (cf. ann. 8 ; fig. 1 - courbe 2).

La démarche entreprise vise à simuler le comportement hydromécanique à l'échelle du puits pour différents paliers de pressions correspondants à ceux qui ont été appliqués expérimentalement en septembre 1996 lors des tests d'injection post stimulation dans GPK2 (tabl. 1, fig. 1 - courbe 4).

Surpression (MPa)	0,5	1,5	3,5	6,7
Débit (l/s)	6,25	15	25	37,5

**Tabl. 1 - Pressions et débits mesurés pendant l'essai d'injection mené en septembre 1996 dans le forage GPK2.**



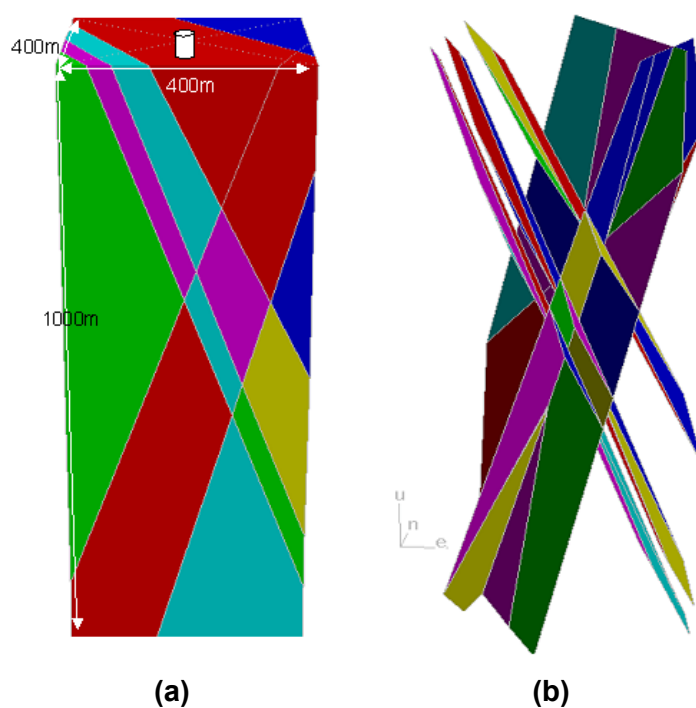
**Fig. 1 - Stimulation hydraulique (courbe 2) et test d'injection post stimulation (courbe 3) réalisés dans GPK2.**

Dans la présente étude, l'état d'équilibre obtenu pendant la simulation du dernier palier de pression (palier à 12 MPa de surpression) appliqué lors de la stimulation est considéré comme un état de référence à partir duquel est étudié le comportement hydromécanique pendant l'essai d'injection réalisé après la stimulation hydraulique.

Le modèle géométrique est identique à celui défini pour la modélisation de la stimulation hydraulique. Les paramètres géométriques des fractures ainsi que la géométrie du modèle ont été établis au cours des travaux antérieurs (Gentier *et al.*, 2002) dont un rappel est donné ici par le tableau et la figure ci-dessous (tabl. 2 et fig. 2).

Fracture N°	Profondeur (m)	Pendage (°)	Dir. Pendage (°)
F1	3 247	65	68
F2	3 350	76	236
F3	3 470	70	68
F4	3 508	70	288
F5	3 566	70	68

**Tabl. 2 - Paramètres géométriques des fractures majeures rencontrées dans le forage GPK2.**

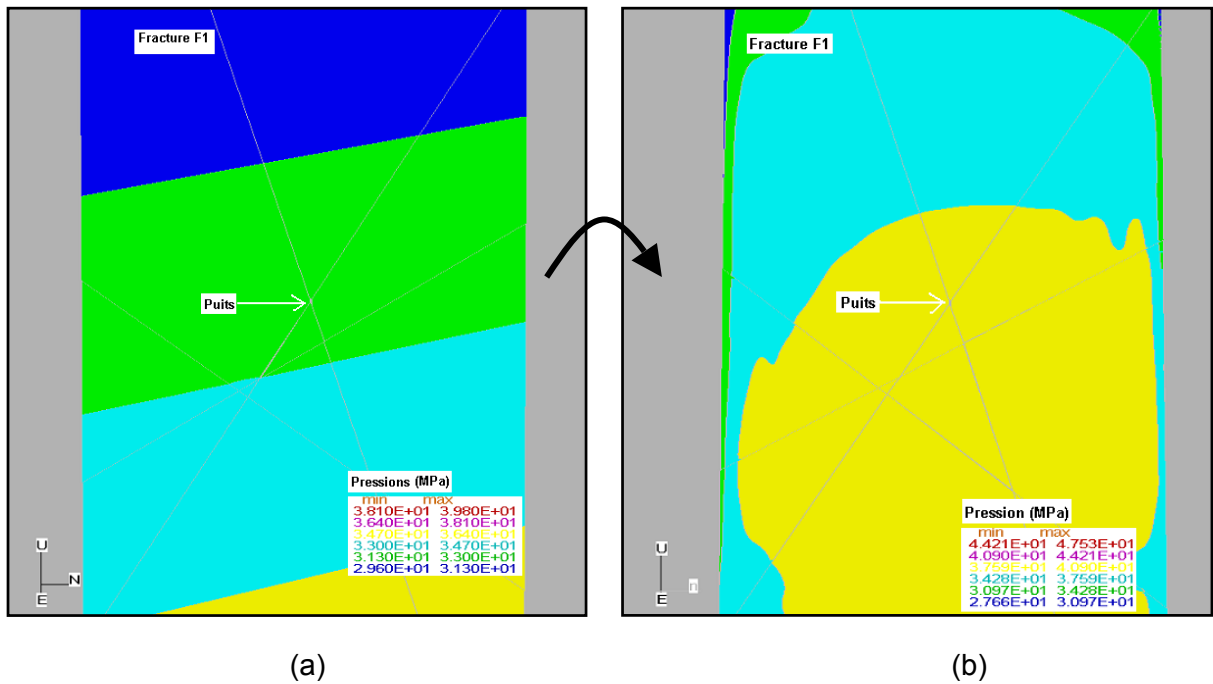


**Fig. 2 - GPK2 : a) Géométrie du modèle en trois dimensions et b) réseau de fractures.**

## 2. État de référence : rappel des éléments de base du modèle

La fracture F1 (tabl. 2) a été choisie comme support pour illustrer la répartition des paramètres hydrauliques (pressions, ouvertures et débits) qui est obtenue à la fin de la modélisation de l'essai de stimulation où la surpression en tête de puits était de 12 MPa.

Les figures ci-dessous montrent la répartition dans la fracture F1 du champ de pressions (fig. 3), des ouvertures hydrauliques (fig. 4) et des débits injectés (fig. 5) qui ont été calculés à la fin de l'essai (cf. ann. 8).



**Fig. 3 - Répartition des pressions dans la fracture F1 de GPK2 : a) champ hydrostatique initial avant la stimulation et b) champ obtenu à la fin de la stimulation.**

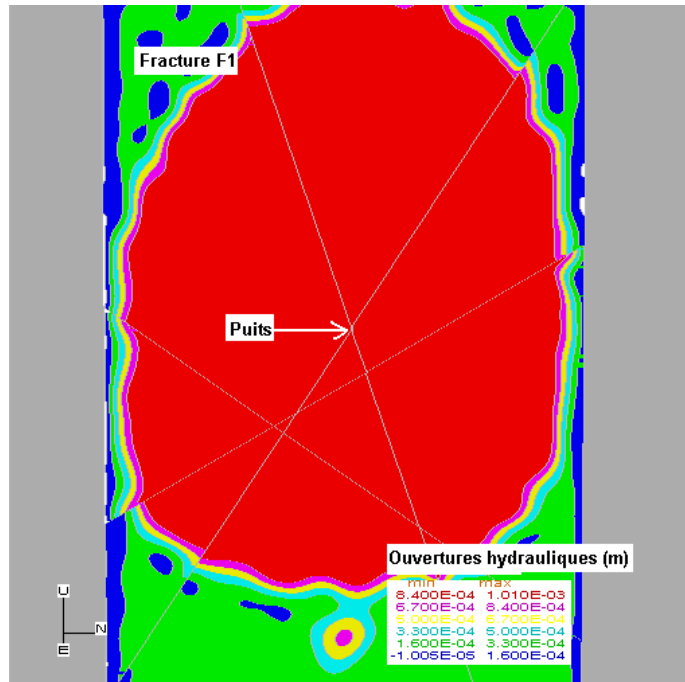


Fig. 4 - Répartition des ouvertures hydrauliques dans la fracture F1 de GPK2 obtenue à la fin de la stimulation à 12 MPa.

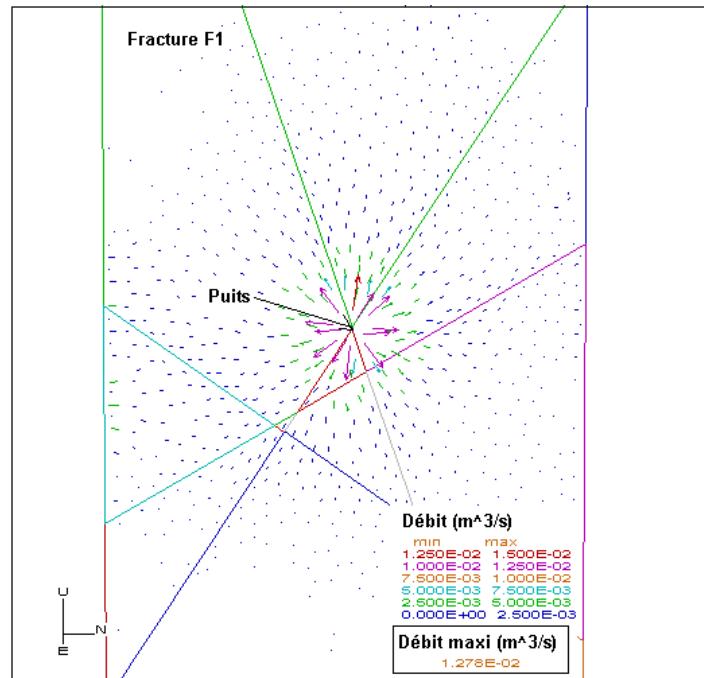
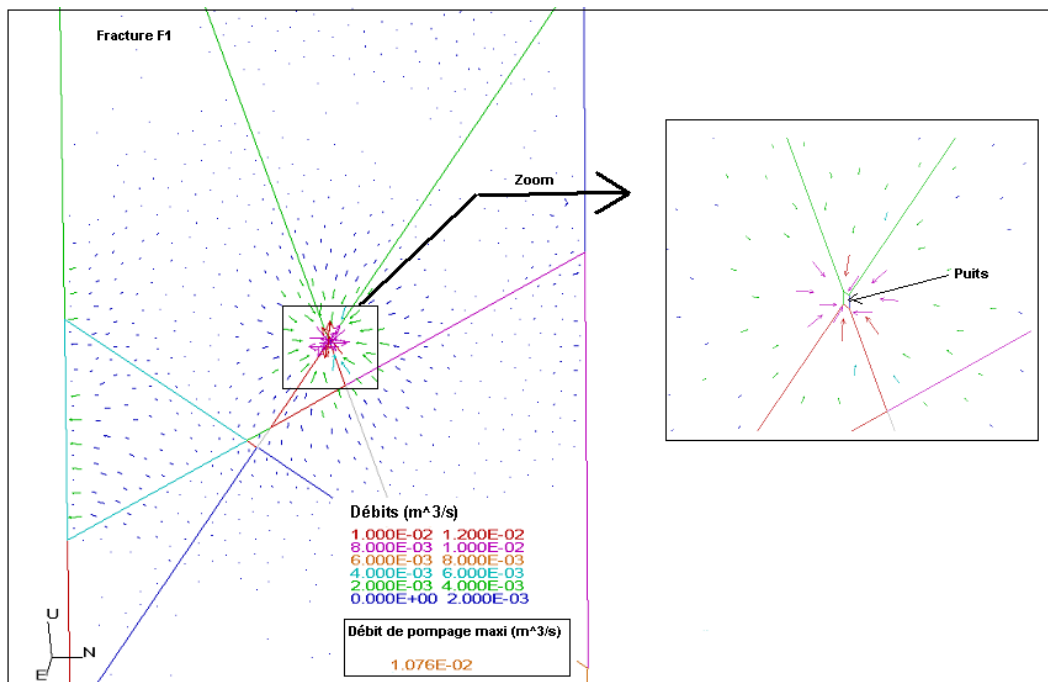


Fig. 5 - Répartition des débits injectés dans la fracture F1 de GPK2 obtenue à la fin de la stimulation à 12 MPa.

### 3. Résultats des modélisations

#### 3.1. HYPOTHÈSE D'UNE PRESSION IMPOSÉE DANS LE PUIT

L'hypothèse qui consisterait à imposer une pression hydrostatique sur les parois du puits pour simuler l'arrêt des injections n'est pas adaptée à la problématique abordée dans ce chapitre. En effet, pour les raisons explicitées au début de ce rapport (cf. § 1.2.), le modèle se comporte dans ce cas comme s'il s'agissait de la simulation d'un essai de pompage (fig. 6).



**Fig. 6 - Répartition des débits dans la fracture F1 dans l'hypothèse où une pression hydrostatique est imposée sur les parois du puits GPK2 pour simuler l'arrêt des injections.**

Les calculs ont été suspendus à ce stade avec une telle hypothèse.

#### 3.2. HYPOTHÈSE D'UN FLUX NUL IMPOSÉ DANS LE PUIT

Pour simuler l'arrêt des injections, une condition de flux nul est substituée aux pressions qui étaient imposées sur les parois du puits au moment de la simulation du dernier palier de stimulation. L'évacuation du fluide existant dans les fractures se produit exclusivement à travers les frontières externes du modèle.

La principale difficulté rencontrée à ce stade provient des temps de calculs qui deviennent extrêmement long. En effet, la procédure de calcul couplée hydromécanique est quasiment inapplicable dans ce cas car, à titre indicatif, une semaine de calcul en continu n'a pas été suffisante pour faire baisser de manière

significative les pressions dans les fractures (fig. 7). Les débits sortants par les frontières du modèle sont encore assez élevés, soit près de 3,6 l/s (fig. 8), et plusieurs jours supplémentaires auraient été nécessaires pour ramener les pressions à des valeurs proches de celles d'un champ hydrostatique.

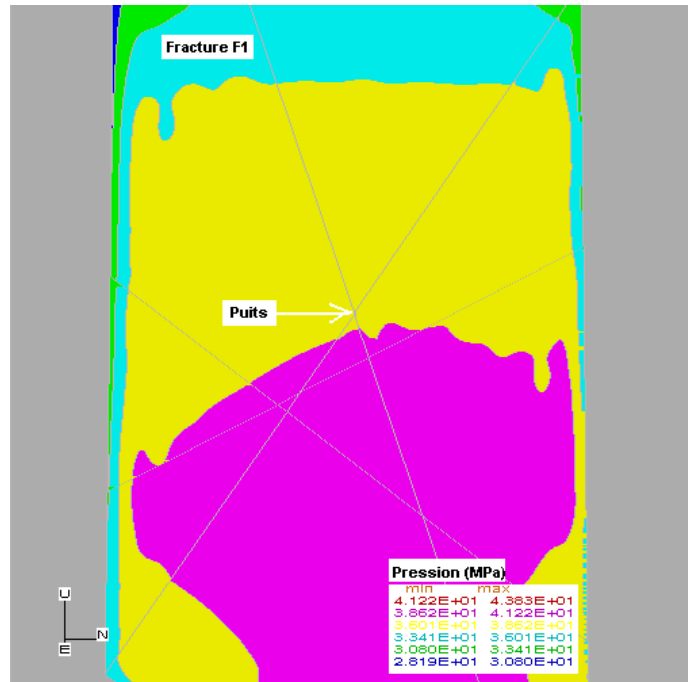


Fig. 7 - Répartition des pressions dans la fracture F1 dans l'hypothèse d'un flux nul sur les parois du puits GPK2 (état après plusieurs jours de calcul).

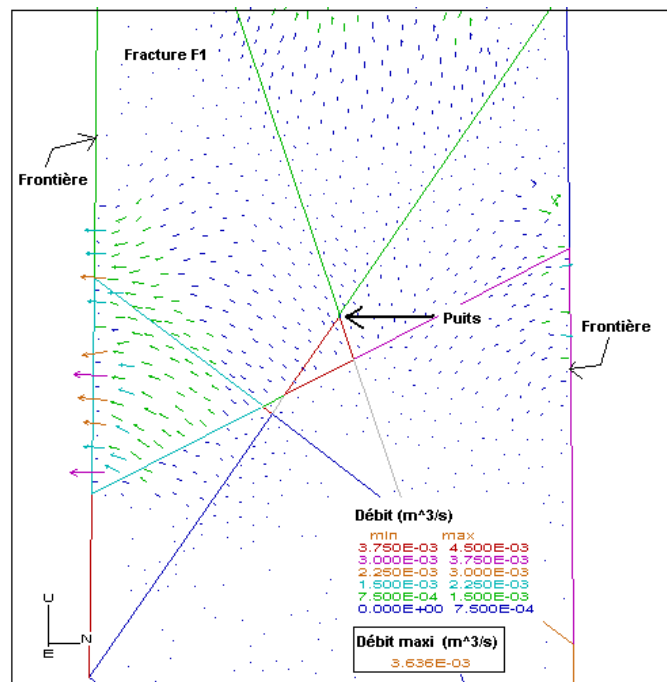


Fig. 8 - Répartition des débits dans la fracture F1 dans l'hypothèse d'un flux nul sur les parois du puits GPK2 (état après plusieurs jours de calcul).

Par ailleurs, la solution qui consiste à découpler la mécanique et l'hydraulique en alternant les cycles de calculs a été testée, mais elle n'a pas permis d'accélérer d'avantage la convergence du modèle vers son état d'équilibre.

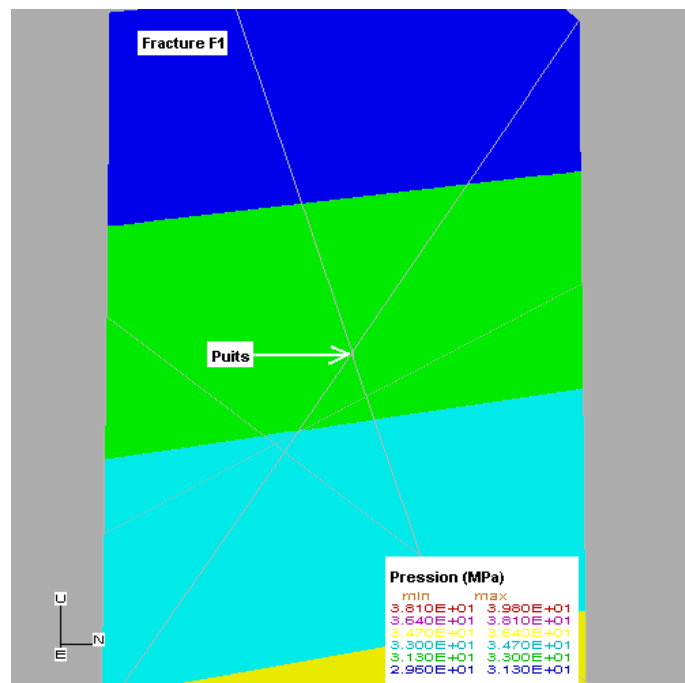
Pour atteindre l'équilibre hydromécanique dans des délais de calculs raisonnables, un champ de pressions évoluant vers un état hydrostatique a été imposé au modèle. Techniquement, ce choix revient à substituer aux pressions existantes dans tous les domaines des plans de fractures des valeurs équivalentes à celles d'un champ hydrostatique. Le modèle réagit dans ce cas en accélérant l'évacuation du surplus de fluide par les frontières jusqu'à ce que les débits sortants soient quasiment nuls.

### 3.3. MISE EN ŒUVRE DU PROCESSUS COUPLE HYDROMÉCANIQUE

Dans cette partie, les simulations ont été menées suivant la procédure de calcul classique utilisée jusqu'à présent, *i.e.* celle qui tient explicitement compte des interactions simultanées entre les pressions et les déformations mécaniques dans les fractures.

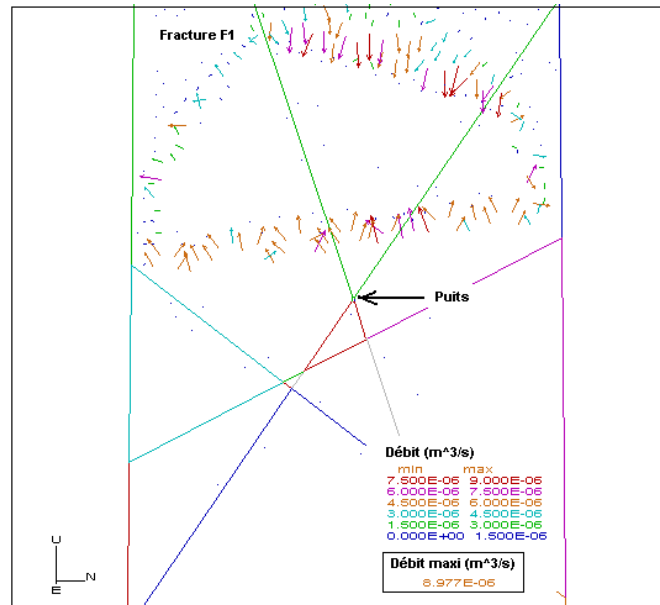
La mise en œuvre de la première phase de calcul dédiée à la recherche du nouvel état d'équilibre suite à l'arrêt des injections a donné les résultats suivants :

- lorsque l'état d'équilibre est atteint, qui est par ailleurs caractérisé par un champ de pression hydrostatique (fig. 9), les débits mis en circulation dans les plans de fractures sont quasiment nuls (fig. 10) ;

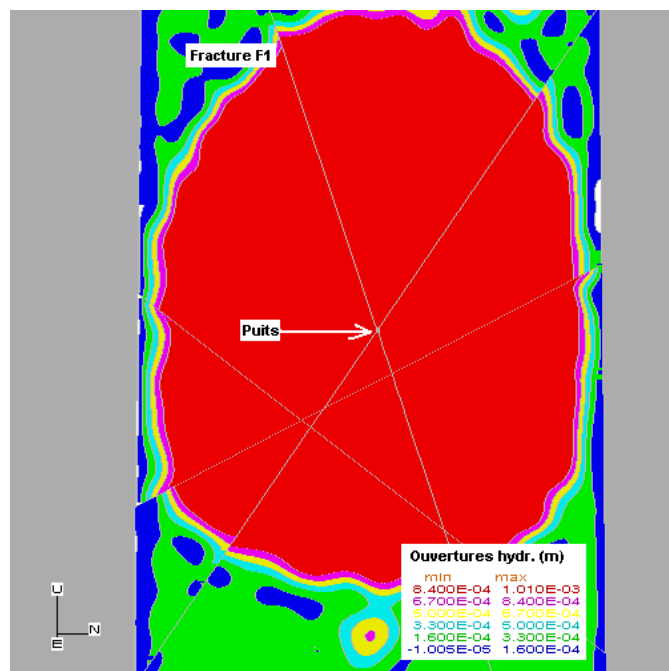


**Fig. 9 - Répartition des pressions dans la fracture F1 à l'état d'équilibre correspondant à la simulation de l'arrêt des injections dans le puits GPK2.**

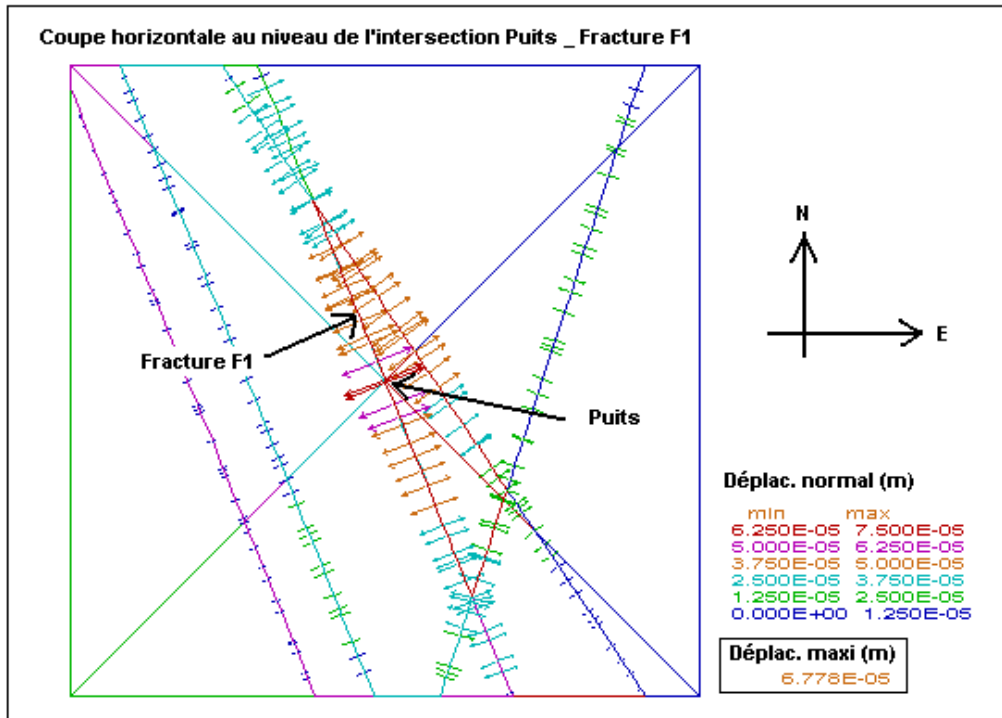
- aucune modification significative n'a été observée en ce qui concerne les ouvertures hydrauliques des fractures et leurs répartitions (fig. 11). En effet, les fermetures mécaniques des fractures (*i.e.* les déplacements normaux de leurs épontes) provoquées par les chutes des pressions ont été assez faibles, soit moins de  $8 \cdot 10^{-2}$  mm (fig. 12), pour influencer de manière sensible les ouvertures hydrauliques.



**Fig. 10 - Répartition des débits dans la fracture F1 à l'état d'équilibre correspondant à la simulation de l'arrêt des injections dans le puits GPK2.**



**Fig. 11 - Répartition des ouvertures hydrauliques dans la fracture F1 à l'état d'équilibre correspondant à la simulation de l'arrêt des injections dans le puits GPK2.**



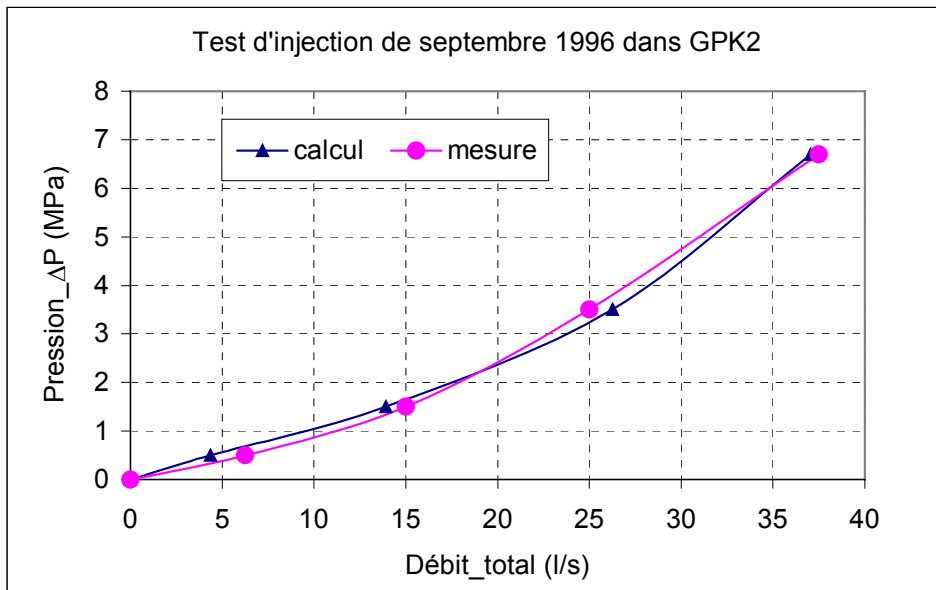
**Fig. 12 - Répartition des déplacements mécaniques dans la direction normal au plan de la fracture F1 à l'état d'équilibre correspondant à la simulation de l'arrêt des injections dans le puits GPK2.**

Pour simuler l'essai d'injection, la pression a été augmentée progressivement dans le puits. Quatre paliers de surpressions ont été étudiés (tabl. 1).

Pour chaque palier, les débits injectés nécessaires à l'établissement de l'équilibre hydromécanique ont été calculés.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- il faut d'abord souligner les bonnes performances du modèle sur le plan du comportement hydraulique, car les prévisions apportées par les calculs ont été cohérentes avec les mesures (fig. 13) ;
- il est important de remarquer qu'une faible augmentation de la pression dans le puits, soit de 0,5 MPa, a permis l'injection d'un débit de près de 5 l/s dans les fractures.



**Fig. 13 - Courbes pression-débit mesurée sur le site et calculée par le modèle lors de la simulation de l'essai d'injection de septembre 1996 dans le forage GPK2.**

## **ANNEXE 10**

# **Modélisation hydromécanique des tests d'injection post stimulation dans GPK1**

Hosni, S. Gentier (CDG/ENE)



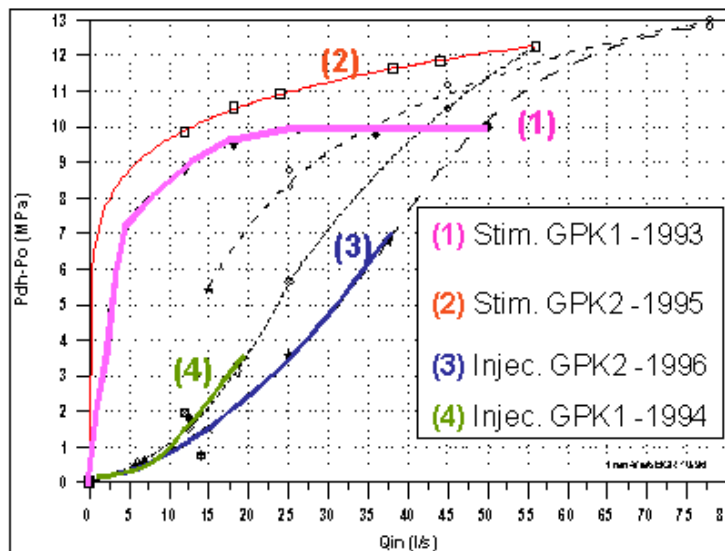
# 1. Présentation du modèle

Les travaux précédents ont abouti à la modélisation de l'essai de stimulation conduit en 1994 dans le forage GPK1 (cf. ann. 7 ; fig. 1 - courbe 1).

La démarche entreprise vise à simuler le comportement hydromécanique à l'échelle du puits pour différents paliers de pressions correspondants à ceux qui ont été appliqués expérimentalement en juillet 1994 lors des tests d'injection post stimulation dans GPK1 (tabl. 1, fig. 1 - courbe 3).

Surpression (MPa)	0,5	1,8	3,3
Débit (l/s)	7,3	12,5	18,5

**Tabl. 1 - Pressions et débits mesurés pendant l'essai d'injection mené en juillet 1994 dans le forage GPK1.**



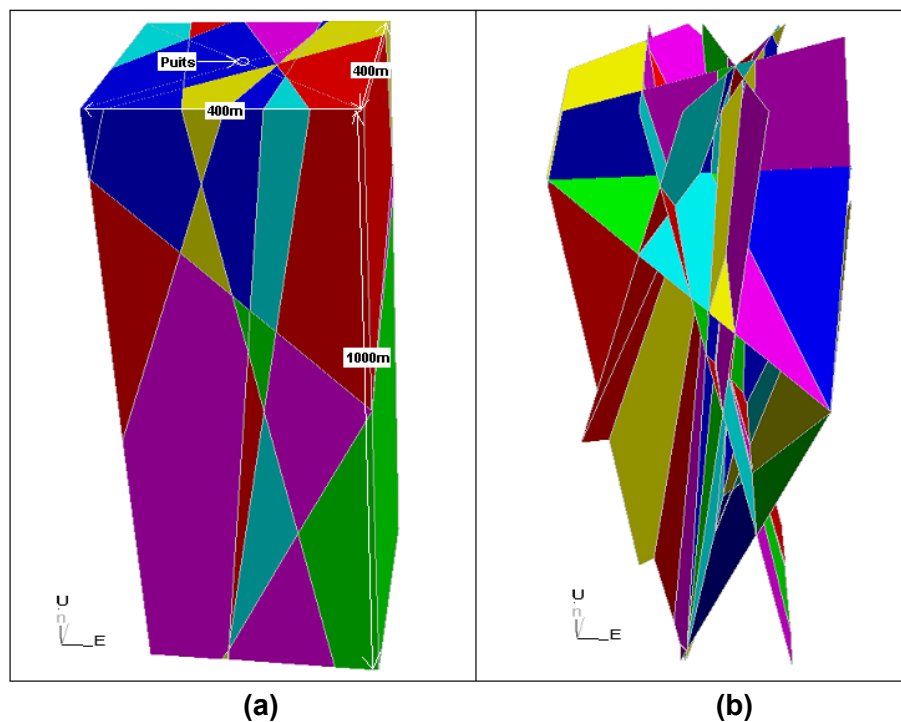
**Fig. 1 - Stimulation hydraulique (courbe 2) et test d'injection post stimulation (courbe 3) réalisés dans GPK2.**

Dans la présente étude, l'état d'équilibre obtenu pendant la simulation du dernier palier de pression (palier à 12 MPa de surpression) appliqué lors de la stimulation est considéré comme un état de référence à partir duquel est étudié le comportement hydromécanique pendant l'essai d'injection réalisé après la stimulation hydraulique.

Le modèle géométrique est identique à celui défini pour la modélisation de la stimulation hydraulique. Les paramètres géométriques des fractures ainsi que la géométrie du modèle ont été établis au cours des travaux antérieurs (Gentier *et al.*, 2002) dont un rappel est donné ici par le tableau et la figure ci-dessous (fig. 2, tabl. 2).

Fracture n°	Profondeur (m)	Pendage (°)	Dir. Pendage (°)
F1	2 867	70	283
F2	2 898	48	122
F3	2 903	78	318
F4	2 965	80	248
F5	3 224	71	88
F6	3 339	83	274
F7	3 498	63	257

**Tabl. 2 - Paramètres géométriques des fractures majeures rencontrées dans le forage GPK1.**



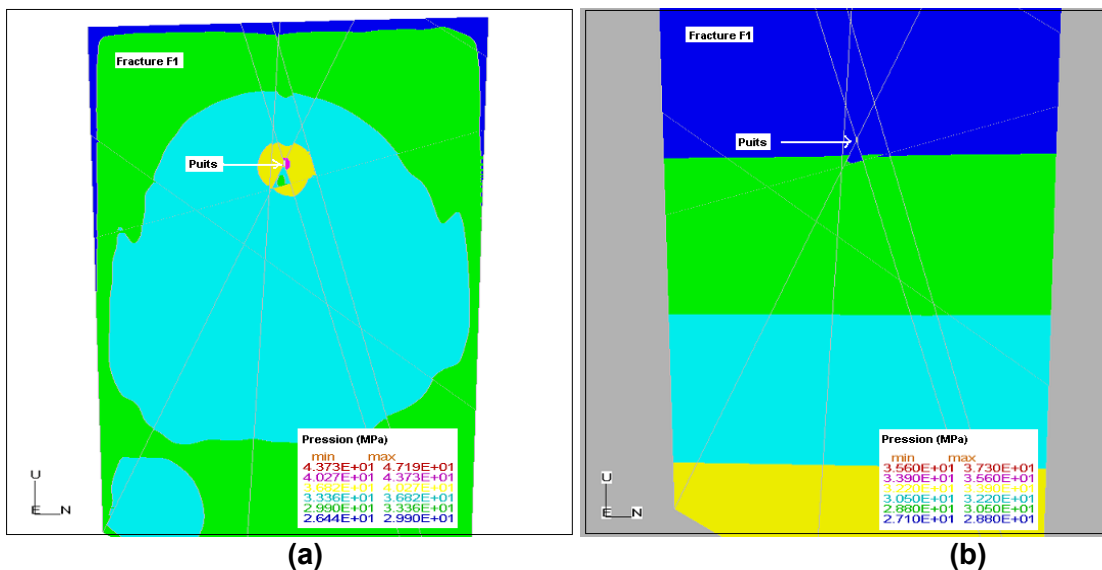
**Fig. 2 - a) Géométrie du modèle de GPK1 en trois dimensions, b) Réseau de fractures.**

## 2. État de référence

La fracture F1 (tabl. 2) a été choisie comme support pour illustrer la répartition des paramètres hydrauliques (pression, ouvertures et débits) qui est obtenue à la fin de la modélisation de l'essai de stimulation où la surpression en tête de puits était de 12 MPa.

Les figures ci-dessous montrent la répartition dans la fracture F1 du champ de pressions (fig. 1), des ouvertures hydrauliques (fig. 4) et des débits injectés (fig. 5) qui ont été calculés à la fin de l'essai (cf. ann. 7).

À partir de cet état de référence qui caractérise l'équilibre hydromécanique obtenu à la fin de la stimulation, une condition de type flux nul a été imposée sur les parois du puits pour simuler l'arrêt des injections. Un nouvel état d'équilibre a été calculé en substituant un champ hydrostatique dans tous les domaines des plans de fractures comme cela a été effectué dans l'étude de GPK2 (cf. ann. 10).



**Fig. 3 - Répartition des pressions dans la fracture F1 de GPK1 : a) champ hydrostatique initial avant la stimulation, b) champ obtenu à la fin de la stimulation.**

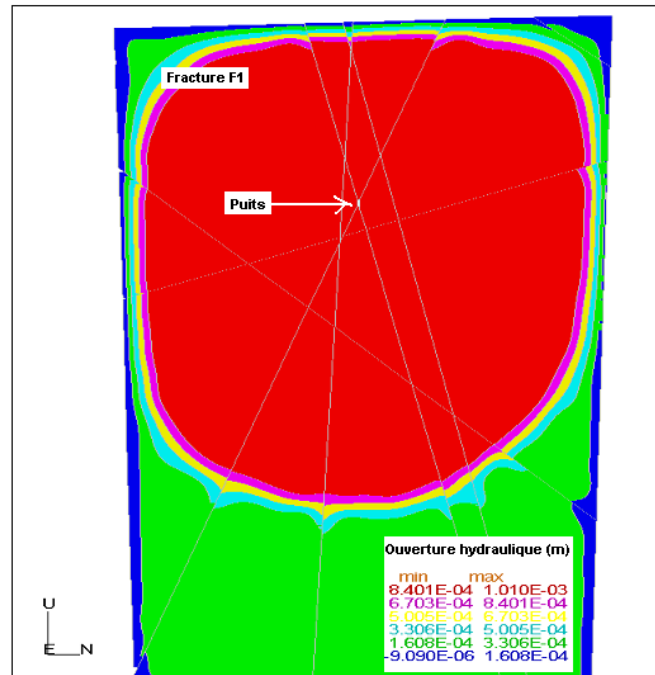


Fig. 4 - Répartition des ouvertures hydrauliques dans la fracture F1 de GPK1 obtenue à la fin de la stimulation à 12 MPa.

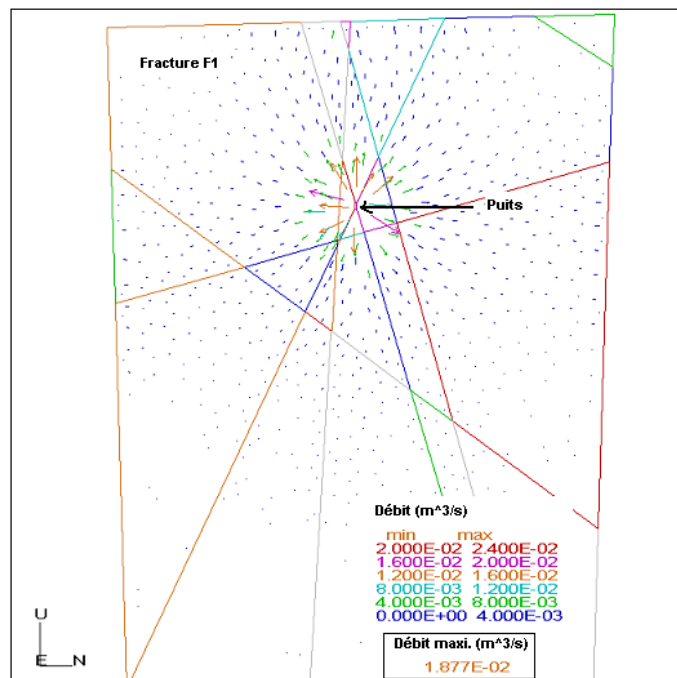


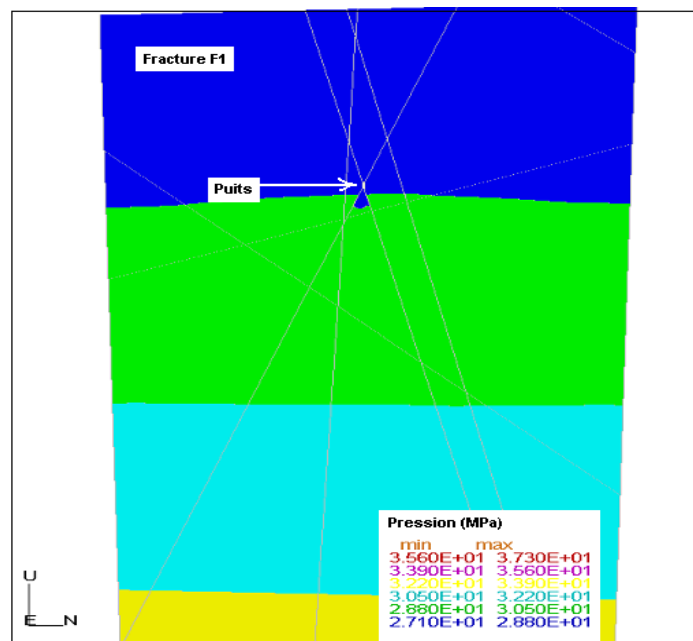
Fig. 5 - Répartition des débits injectés dans la fracture F1 de GPK1 obtenue à la fin de la stimulation à 12 MPa.

### 3. Résultats de la modélisation

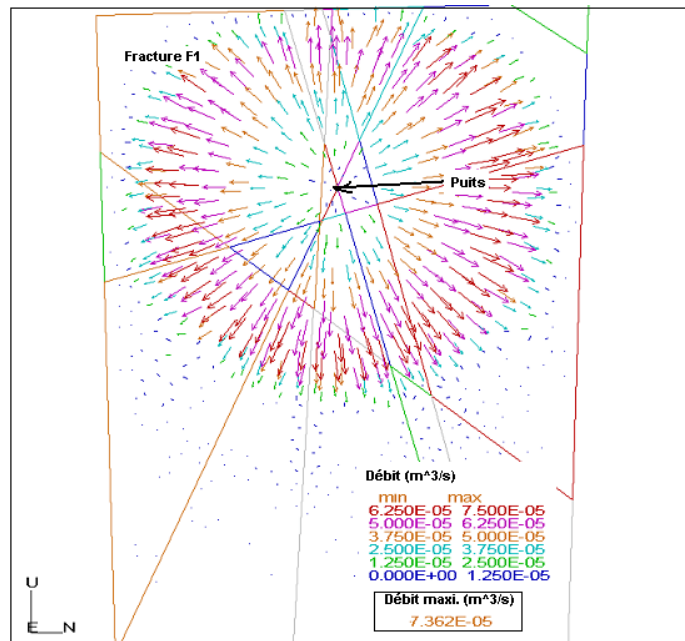
Les calculs ont été réalisés selon la procédure classique qui tient explicitement compte des interactions simultanées entre les pressions et les déformations mécaniques dans les fractures (processus couplé).

La mise en œuvre de la première phase de calcul dédiée à la recherche du nouvel état d'équilibre suite à l'arrêt des injections a donné les résultats suivants :

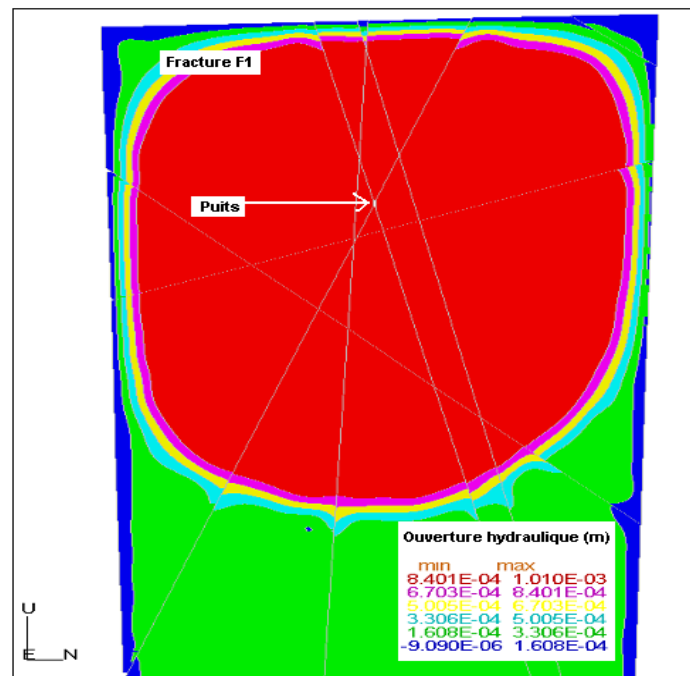
- le modèle évolue vers un état d'équilibre hydromécanique qui se caractérise par un champ de pression hydrostatique (fig. 6). Les débits mis en circulation dans les fractures pour faire évacuer les fluides excédentaires sont faibles, soit environ 0,07 l/s au maximum (fig. 7) ;
- aucune modification significative n'a pu être observée en ce qui concerne les ouvertures hydrauliques des fractures et leurs répartitions (fig. 8). En effet, les fermetures mécaniques des fractures (*i.e.* les déplacements normaux de leurs épontes) provoquées par les chutes des pressions ont été assez faibles, soit moins de  $7,5 \cdot 10^{-2}$  mm (fig. 9), pour influencer de manière sensible les ouvertures hydrauliques.



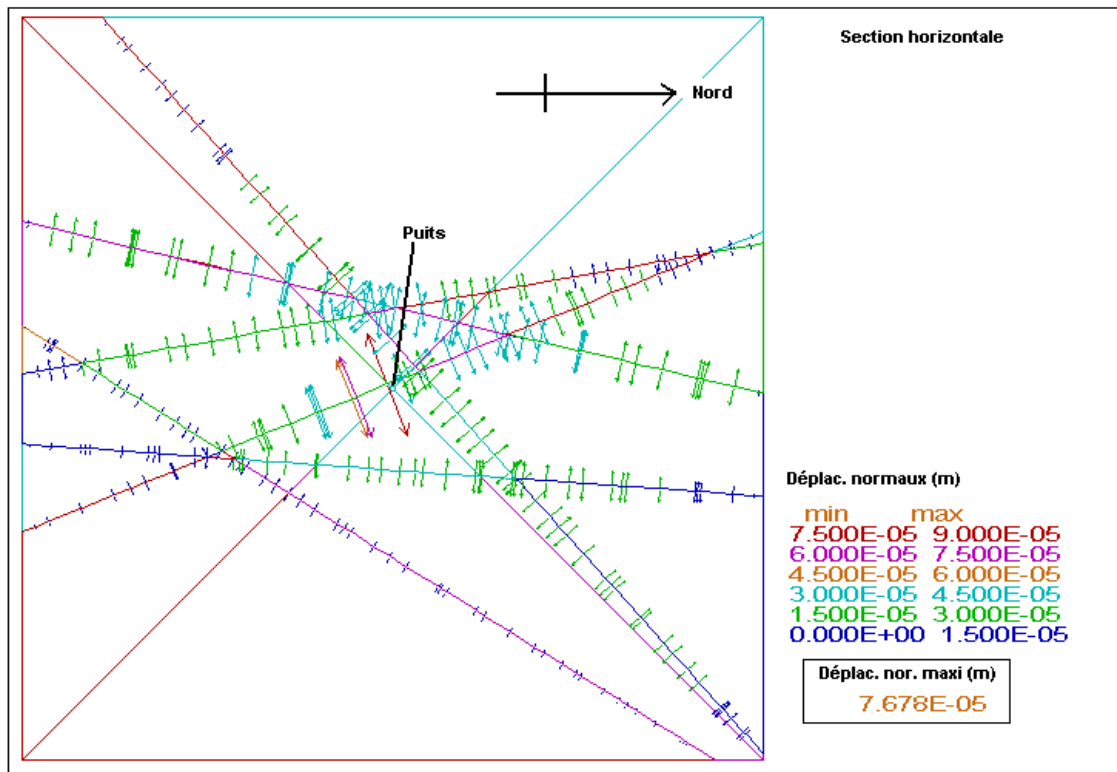
**Fig. 6 - Répartition des pressions dans la fracture F1 à l'état d'équilibre correspondant à la simulation de l'arrêt des injections dans le puits GPK1.**



**Fig. 7 - Répartition des débits dans la fracture F1 à l'état d'équilibre correspondant à la simulation de l'arrêt des injections dans le puits GPK1.**



**Fig. 8 - Répartition des ouvertures hydrauliques dans la fracture F1 à l'état d'équilibre correspondant à la simulation de l'arrêt des injections dans le puits GPK1.**



**Fig. 9 - Répartition des déplacements mécaniques dans la direction normale au plan des fractures à l'état d'équilibre correspondant à la simulation de l'arrêt des injections dans le puits GPK1.**

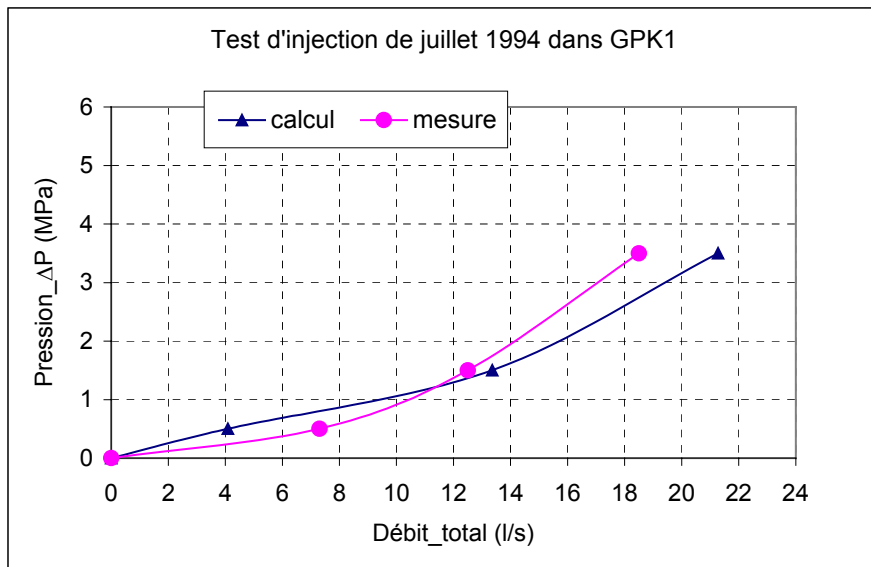
Pour simuler l'essai d'injection, la pression a été augmentée progressivement dans le puits. Quatre paliers de surpressions ont été étudiés (tabl. 1). Pour chaque palier, les débits injectés nécessaires à l'établissement de l'équilibre hydromécanique ont été calculés.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- les prévisions du modèle en terme d'évolution des débits sont relativement assez proches des mesures (fig. 10). L'analyse fine de la participation des fractures aux écoulements montre une forte participation des fractures F1 et F6 avec un pourcentage moyen de près de 30 % (tabl. 3). La fracture F7, la plus profonde, absorbe près de 20 % du fluide injecté, et elle est talonnée de près par la fracture F5 qui absorbe presque 12 % (tabl. 3) ;
- il est important de remarquer que la stimulation antérieure a bien atteint le but escompté puisque les pressions nécessaires à l'injection de forts débits sont relativement basses.

Fracture N°	Surpression $\Delta P = 0,5$ MPa	Pourcentage de flow / fracture	Surpression $\Delta P = 1,8$ MPa	Pourcentage de flow / fracture	Surpression $\Delta P = 3,3$ MPa	Pourcentage de flow / fracture
	Débit (l/s)		Débit (l/s)		Débit (l/s)	
F1	1,26	<b>31</b>	3,7	<b>28</b>	6,39	<b>30</b>
F2	0,017	<b>0</b>	0,061	<b>0</b>	0,117	<b>1</b>
F3	0,33	<b>8</b>	1,009	<b>8</b>	1,75	<b>8</b>
F4	0,027	<b>1</b>	0,085	<b>1</b>	0,155	<b>1</b>
F5	0,47	<b>11</b>	1,7	<b>13</b>	2,61	<b>12</b>
F6	1,17	<b>29</b>	4,09	<b>31</b>	6,175	<b>29</b>
F7	0,82	<b>20</b>	2,71	<b>20</b>	4,09	<b>19</b>
Débit Total (l/s)	4,094	<b>100</b>	13,355	<b>100</b>	21,287	<b>100</b>

**Tabl. 3 - Répartition des débits d'injections calculés pour chaque fracture et par palier de surpression en tête de puits dans GPK1 (essai d'injection de septembre 1994).**



**Fig. 10 - Courbes pression-débit mesurée sur le site et calculée par le modèle lors de la simulation de l'essai d'injection de juillet 1994 dans le forage GPK1.**

## **ANNEXE 11**

# **Coupled THM modeling of the stimulated permeable fractures in the near well at the Soultz-sous-Forêts site (France)**

A. Hosni<sup>1</sup>, S. Gentier<sup>1</sup>, A. Genter<sup>1</sup>, J. Riss<sup>2</sup>, D. Billaux<sup>3</sup> and F. Dedecker<sup>3</sup>

<sup>1</sup>BRGM

<sup>2</sup> University Bordeaux 1

<sup>3</sup> Itasca Consultants SA

**Article publié et présenté à : GeoProc 2003 : International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geosystems - Stockholm - 13-15/10/2003**



## COUPLED THM MODELING OF THE STIMULATED PERMEABLE FRACTURES IN THE NEAR WELL AT THE SOULTZ-SOUS-FORÊTS SITE (France)

A. Hosni<sup>1</sup>, S. Gentier<sup>1</sup>, A. Genter<sup>1</sup>, J. Riss<sup>2</sup>, D. Billaux<sup>3</sup> and F. Dedecker<sup>3</sup>

<sup>1</sup> BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, B.P. 6009, 45060 Orléans cedex 2, France

<sup>2</sup> CDGA, University Bordeaux 1, Av. des Facultés, 33405 Talence, France

<sup>3</sup> Itasca Consultants S.A., 64 chemin des Mouilles, 69130 Ecully, France

**Abstract:** The stimulation of the deep wells drilled in the Soultz-sous-Forêts geothermal site (France) by the injection of cold and pressurised water demonstrates that the access zones of the fluid to the fracture network is limited to a few fractures. In the near well at the scale of some meters, a decrease of the impedancy is outlined via hydraulic vibration tests and is presently not well understood. As a consequence, the thermo-hydro-mechanical responses in the nearest of the stimulated fractures must be investigated. A numerical approach, based on the representation of the rock mass by circular particles, is developed taking into account the mineral phases of the different type of granite present in the vicinity of the permeable fractures. The model results show that the THM load can lead to a degradation which depends on the type of granite, creating the possibility of fissure propagation leading to an increase of porosity in the near well.

### 1. INTRODUCTION

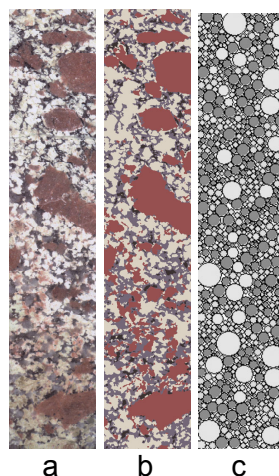
This work is a part of a European research program initiated at the Soultz-sous-Forêts site (France) in 1987 which aims to develop a pilot plant for extracting heat accumulated in the deep fractured granitic basement. Heat extraction must be carried out by forced circulating of a fluid between three wells drilled at 5 km depth.

The experiments conducted so far at the site in range of depths between 3000 and 3800 m show that hydraulic stimulation techniques can considerably increase the permeability in a rock volume that can extend up to several hundred meters around the well, thereby serving to establish connections between the wells. The major impact of the hydraulic stimulation could be explained by hydromechanical mechanisms (ruptures in fracture planes). However in the near well at the scale of some meters, a decrease of the impedancy is outlined via

hydraulic vibration tests and is presently not well understood. As at this scale, the hydromechanical effect cannot be dissociated from the thermal effect due to the injection of a cold water in a hot media, the thermo-hydro-mechanical responses of the stimulated fractures must be investigated.

Then, a numerical approach, based on a representation of the modelled environment by discrete circular particles that interact via contacts points is developed to study the thermo-hydro-mechanical (THM) behaviour of the access zones with the Particle Flow Code PFC2D, Itasca (1995). Indeed, modelling with PFC2D offers the possibility to study the THM behaviour in a transient state and to take into account the real mineral structure for the environment of the most stimulated fractures which are in a limited number. Effectively, investigations conducted during stimulation and injection tests in the open hole sections of first two wells by different techniques (UBI, flow logs, temperature logs) showed that the

fluid has access to the heat exchanger along only three main fractured zones which were identified in each well, Evans (1996), Tenzer (1997). The three main fractured zones which support flow were characterised from a petrographic, structural and geometric standpoints from borehole imaging and well log, Genter (2000). Five main petrographic facies have been identified corresponding for four of them to more or less altered and deformed granites and for the fifth to quartz vein.



**Fig. 1 - Quantitative analysis of the hydrothermalized granite. a: original sample ; b: sample reconstructed after automatic identification of each mineral phases ; c: sample reconstructed for PFC model from statistical analysis of original samples.**

The main objective is to quantify the possible effects of the THM behaviour of one of the stimulated fracture in relation with its petrographic, structural and physical environment. This modelling procedure takes into account the properties of the main rock facies surrounding the permeable zone.

We will present in this paper some first results obtained for one of these stimulated fractures located at a depth of 3224 m in one well.

## 2. CHARACTERIZATION OF THE MINERAL PHASES

The stimulated fracture chosen for the THM analysis is at the interface between a hydrothermalized granite and quartz vein. At the meter scale of the model, the particle modelling approach requires to quantify the granulometry and the distribution of each mineral phase to define at best the distribution of particle radii.

An algorithm for an automatic identification of each mineral phases has been developed to process images of sections in hydrothermalized granite in order to quantify the granulometry of each phase (Riss et al., 2001). Percentages for each mineral phase are presented in the Table 1. For the quartz vein, having no specific information, it has been considered as completely monomineral with a heterogeneous radii distribution.

To complete the model, physical, mechanical and thermal properties must be attributed to each particle. The parameters used for the model are presented in Table 2, Gentier (2001). The parameters of altered plagioclases have been assimilated to those of some clay minerals because of the alteration process of plagioclases. In this case, we have assume a transformation of all the plagioclases (100%).

**Table 1. Percentage and particle radii of the main mineral phases introduced in the model : hydrothermalized granite (HYDR) and Quartz vein (VEIN).**

Facies and radius	K Feldspars.	Altered Plagioclases	Quartz	Black minerals (Biotite mainly)
HYDR	22%	39%	32%	7%
R <sub>min</sub> (mm)	3	2	1,5	1
R <sub>max</sub> (mm)	12	6	3,5	2
R <sub>mean</sub> (mm)	7,5	4	2,5	1,5
VEIN	0%	0%	100%	0%

**Table 2. Thermo-mechanical properties for the main mineral phases.**

	K Feldspar s.	Altered Plagio- -clases	Quartz	Black minerals (Biotite mainly)
$\lambda$	1,612	1,612	5,2	1,976
$\alpha$	0,385	1,4	3,5	1,4
C	679	707	700	700
d	2560	2329	2653	3051
E	38445	21076	57900	62185
$\nu$	0,28	0,28	0,08	0,21
$R_c$	173	103	207	200

$\lambda$ : thermal conductivity (W/m°C);  $\alpha$ : linear thermal expansion coefficient ( $10^{-5}/^\circ\text{C}$ ); C: particle specific heat at constant volume; d: density ( $\text{kg/m}^3$ ); E: Young's modulus (MPa),  $\nu$ : Poisson's ratio and  $R_c$ : compressive strength (MPa).

### 3. NUMERICAL APPROACH – NEAR WELL

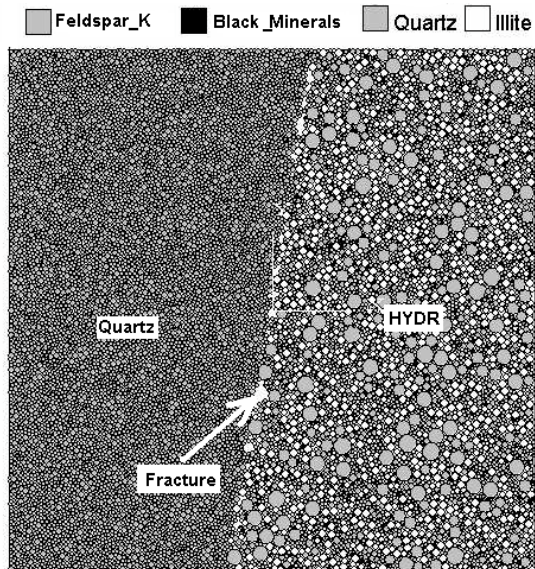
#### 3.1. PFC<sup>2D</sup> modelling

In the model, the mineral phases are represented by circular particles obeying to a statistical law based on the data presented in the table 1 and by respecting the spatial distribution for each phase.

In Figure 2, we present a simplified two dimensional geometrical model obtained for the permeable fracture identified between a quartz vein and hydrothermalized granite and located at 3224 m depth. The dimension of the modelled zone is equal to 70 cm and the measured dip for the fracture is 81°. From the mechanical standpoint, the particles have a density and are interlinked by contacts which are defined by their normal and tangential stiffnesses, a friction coefficient and a microscopic cohesion. A “cohesive” behaviour model serves to define a fracture threshold that determines the normal and tangential forces that can be withstood by the inter particle links. Hence, a micro crack appear when the

contact between two adjacent particles is broken. When a connection between several micro cracks takes place, it can generate a new fracture in the model.

The first difficulty encountered in a discrete element approach is to correctly define the microscopic input parameters, which help to reconstruct the macroscopic behaviour determined from the measurements for each facies. This step is carried out in several stages, the first being to fit the macroscopic elastic parameters (Young's modulus and Poisson's ratio), followed by fitting the parameters of plastic behaviour (cohesion and friction angle for the Mohr-Coulomb criterion used in the present paper).



**Fig. 2 - Vertical cross section within the simplified geometrical model.**

In this study, the macroscopic parameters considered for the two facies are presented in the Table 3.

From the thermal standpoint, each particle is considered to be a heat reservoir, which exchange heat with its neighbours by conduction in transient state through conduits represented by cemented bonds. Heat exchange disappears once the contact between

the two particles is broken thus allowing to simulate a decrease of the equivalent thermal conductivity according to the number of the broken contacts in the model.

**Table 3: Mechanical parameters considered for the hydrothermalized granite (HYDR) and quartz vein (VEIN).**

	Elastic parameters	Plastic parameters
HYDR	E = 33,5 MPa ν = 0,26	Φ = 37,5° C = 35,8 MPa
VEIN	E = 57,9 MPa ν = 0,26	Φ = 36,5° C = 50,5 MPa

In this model, we assume that the temperature variations due to mechanical deformation of the particles are negligible. We also ignored heat transfer by convection.

Deformations and particle radius variations induced by thermal variations are calculated in the model by the followed equations:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \alpha \Delta T \delta_{ij} \quad (1)$$

$$\Delta R = \alpha R \Delta T \quad (2)$$

where  $\alpha$  represent the linear expansion coefficient and R the particle radius.

The hydraulic pressures are simulated in the model by imposing a constant force on the open portions of the fracture.

### 3.2. Boundaries and Initial THM conditions

The natural stress field were determined by hydraulic fracturing, Klee (1993), in combination with the determination of the maximum stress direction based on borehole images. The values obtained for the principle stresses at a depth of 3224 m are respectively equals to -81 MPa for the

vertical stress ( $\sigma_v$ ), -83 MPa for the maximal horizontal stress ( $\sigma_H$ ) which is oriented N170° from the east and -42 MPa in the perpendicular direction ( $\sigma_h$ ).

*In situ* measurements also indicate the presence of a hydrostatic pressure field which is done by the expression above:  $P = \rho g z$ , where  $\rho$  represent the fluid density assumed to be equal to a value of 1000kg/m<sup>3</sup> in the model and z the depth.

Initially, we assume a constant temperature of 150°C for the rock mass and a temperature of 20°C for the injected fluid which is maintained constant during the calculations.

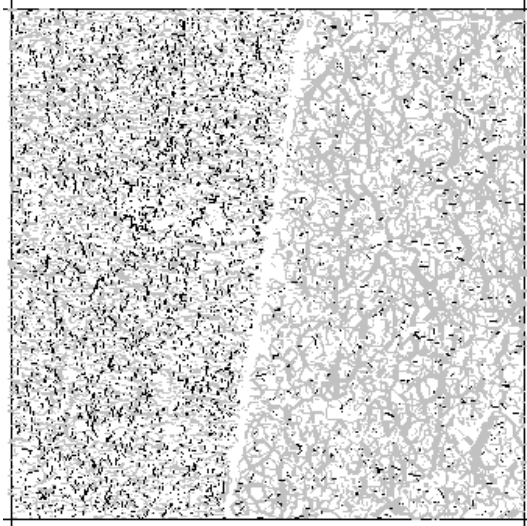
We also assume an adiabatic conditions and zero displacements on the boundaries of the model.

The hydraulic solicitations (pressures) are applied in the model in several successive phases which are defined from the data obtained during the hydraulic tests in the well. In a first stage, the water pressure applied in the fracture was increased gradually from 0 to a value of 41 MPa which is closed to the minimal horizontal stress ( $\sigma_h$ ). During the following stages, the water pressure was increased by 1 MPa, 1,5 MPa, 2 MPa, 2,5 MPa and 3 MPa.

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

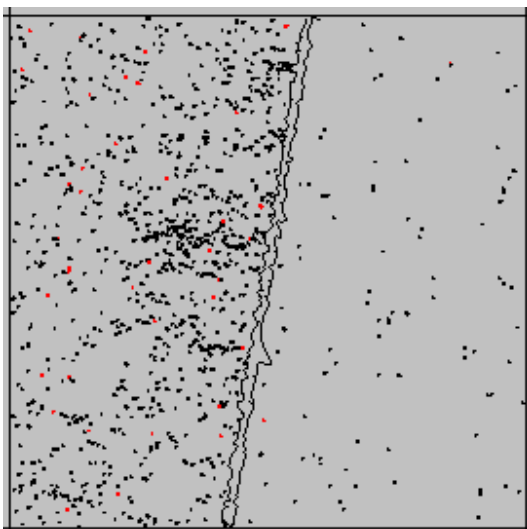
After the first stage of hydraulic pressure, the contact forces between particles are primarily in compression and no contact was broken. When the heat exchange is applied in the model, the distribution of forces reveals greater tensional forces (black lines) in the quartz vein in comparison with the hydrothermalized granite. Also, the compressive forces (light grey lines) are much less developed in the quartz vein

compared with the hydrothermalized granite (Fig. 3).



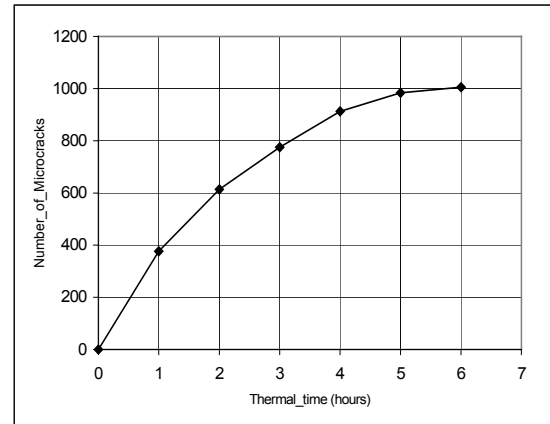
**Fig. 3 - Distribution of forces after 6 hours of heat exchange.**

A lot of micro cracks occur within the quartz vein and the hydrothermalized granite. However, the two facies behave differently with a very high micro crack development within the quartz vein (Figure 4).



**Fig. 4 - Micro cracks obtained after 6 hours of thermal exchange (Left: quartz vein , right: hydrothermalized granite) .**

Also, the number of micro cracks is ten times more significant in quartz vein than in the hydrothermalized facies and the main part of micro cracks appears during the first four hours of heat exchange (Fig. 5).



**Fig. 5 - Evolution of the total number of micro cracks versus time during the thermal exchange.**

The percentage of contact bonds broken in the quartz vein after six hours of heat exchange is 4,25% whereas it is only 0,55% in the hydrothermalized granite.

Difference in the behaviour between the two facies is primarily of thermal origin. In fact, the heterogeneity of the mineralogical content of the hydrothermalized granite gives it thermal properties that are relatively lower than those of the facies composed exclusively of quartz.

We also studied the influence of the particle sizes of the quartz on the behaviour presented below and no significant difference was noted since the same percentage of micro cracks was obtained, i.e. 4,25%, by multiplying in the model the radius of the quartz particles by two.

In general, the fracturing of the inter-particle bonds are mostly in tension (only 38 micro cracks are from shear mechanism) and are of thermal origin particularly in the quartz vein.

In the model, the micro cracks of thermal origin obtained in the quartz vein can coalesce initiating small new fractures (Fig. 6), and also contribute to increase porosity in the near wall.

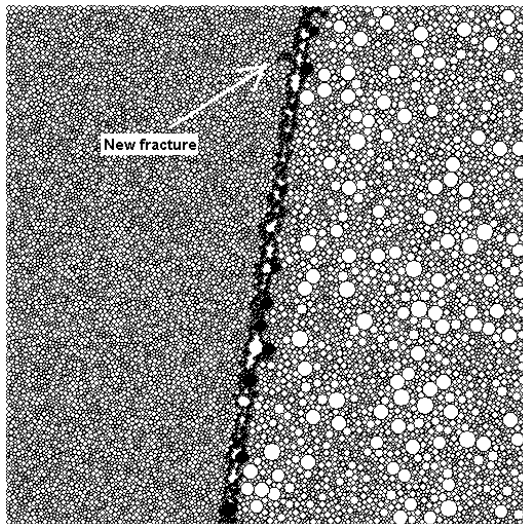


Fig. 6 - Propagation of a new fracture in the quartz facie.

At this local scale (metric scale), the modelling shows that the thermal balance is reached after 48 hours of heat exchange, i.e. temperature of all particles is equal to 20°C (Fig. 7).

If we assume an initial temperature for the injected fluid equal to 70°C instead of 20°C currently used in the previous model, the total number of micro cracks after six hours of heat exchange is almost 40% less significant than in the reference model and the micro cracks are mainly located in the quartz facies (Fig. 8).

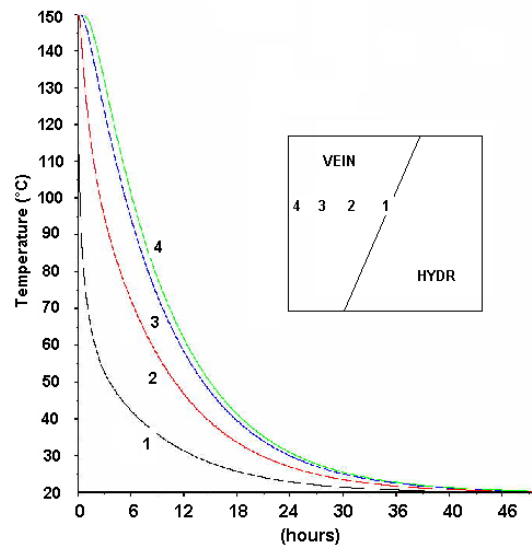


Fig. 7 - Temperature versus time calculated in the quartz vein.

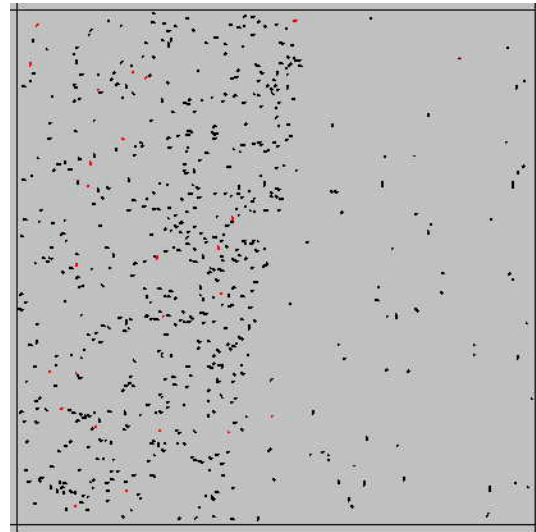


Fig. 8 - Micro cracks distribution obtained for a temperature fluid equal to 70°C.

A second case study, in which the fracture is assumed to be located exclusively in a hydrothermalized facies, revealed better resistance to thermal loading than the previous case. In fact, the percentage of contact bonds broken is closed to 0,25% of the total contacts in the model.

## 5. CONCLUSION AND PERSPECTIVE

The main results obtained by the numerical approach developed above to study the thermo-hydro-mechanical behaviour of the stimulated fractures are:

- the immediate walls of the permeable fracture can undergo thermal alterations whose importance depends on the type of rocks in the surrounding;
- hydrothermalized granite facies shows better resistance to thermal loading than the quartz facies which develops more micro cracks (ten times more than hydrothermalized facies). Hence, a first interpretation of this result is that the cohesion of the fracture walls can be much reduced by the thermal effect. This information is taken into account in a model presently in preparation which aims to study the hydro mechanical behaviour at a heat exchanger scale (hectometric scale) obtained during the hydraulic stimulation tests conducted in the site;
- alterations of the facies are mainly from thermal origin and could lead to initiate new fractures if the facies thermal properties surrounding the permeable fracture are high.

In the future, the results obtained by the current model will be compared to another one in which stresses are applied as a boundary conditions allowing us to better quantify the shear displacements induced along the fracture than with the fixed displacement conditions.

The model will be implemented in the study of the others access zones and will integrate the cataclazed and brecciated granite facies which were identified in the surrounding of the permeable fractures.

This work was carried out with funding from European Community, ADEME (French Agency for Energy) and BRGM.

## REFERENCES

- Evans K., Kohl T., Hopkirk R., Rybach L. 1996. « *Studies of the nature of non-linear impedance to flow within the fractured granitic reservoir at the European Hot Dry Rock Project site at Soultz-sous-Forêts, France* ». ETH Zurich Final Report July 1996, 144p.
- Genter A., Traineau H., Bourguin B., Ledesert B., Gentier S. 2000. « *Over 10 years of geological investigations within the European Soultz HDR project, France* ». Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000, Full length paper on Cd-Rom, Editors E. Iglesias, D. Blackwell, T. Hunt, J. Lund, S. Tamanyu, 3707-3712.
- Gentier S., et al. (2001). « *Modélisation de l'interface puits-échangeur (Soultz-sous-Forêts) : acquisition des données de base et développements préliminaires* ». rapport BRGM RP-51764-FR, 349 p.
- Gérard. A., Baumgaertner. J., Baria R., Jung R., Gentier S., Genter A., (2002). « *Elements for a conceptual model of the underground heat exchanger at Soultz-sous-Forêts (France)- situation beginning 1998* », Geologisches Jahrbuch Sonderhest, Proceeding of the international Conference for HDR forum, Strasburg France 1998, 281-290.
- Itasca, 1995. « *PFC<sup>2D</sup>, Particle Flow Code in 2 Dimensions* », User's Manual. Itasca Consulting Group, Minneapolis, MN.

- Klee, G., Rummel, F. 1993.  
« *Hydrofrac stress data for the European HDR Research Test Site Soultz-sous-Forêts* ». Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., 30(7) : 973-976.
- Riss, J., Gentier, S., Genter, A. 2001.  
« *Granitic core cross section : numerical modelling* ». Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium for Stereology and Image Analysis.
- Tenzer, H., Schanz, U., 1997.  
« *Development and characterization of HDR heat exchanger. Reprocessing of fracture orientation in drill hole GPK2 and evaluation of production logging data in drill holes GPK1 and GPK2* ». Periodic report from SWBU, 01/02/96-31/01/1997.

**Centre scientifique et technique**  
**Service connaissance et diffusion de l'information géologique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34