

Eléments de réflexion sur le comportement mécanique des zones de faille dans un modèle 3D DEM pour la stimulation hydraulique des puits dans les réservoirs géothermiques

Arnold Blaisonneau, Théophile Guillon, Sylvie Gentier, Xavier Rachez

▶ **To cite this version:**

Arnold Blaisonneau, Théophile Guillon, Sylvie Gentier, Xavier Rachez. Eléments de réflexion sur le comportement mécanique des zones de faille dans un modèle 3D DEM pour la stimulation hydraulique des puits dans les réservoirs géothermiques. 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics, May 2015, Montreal, Canada. pp.1-15. hal-01112388

HAL Id: hal-01112388
https://brgm.hal.science/hal-01112388

Submitted on 2 Feb 2015

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

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

ELEMENTS DE REFLEXION SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES ZONES DE FAILLE DANS UN MODELE 3D DEM POUR LA STIMULATION HYDRAULIQUE DES PUITS DANS LES RESERVOIRS GEOTHERMIQUES

* Arnold BLAISONNEAU, Théophile GUILLON, Sylvie GENTIER, Xavier RACHEZ
BRGM, Geothermal Energy Department
3 Avenue Claude Guillemin
45000 Orléans, France
*(*Corresponding author: a.blaisonneau@brgm.fr)*

ABSTRACT

L'étude présentée ici vise à étudier l'influence, lors de stimulation hydraulique de puits dans les réservoirs géothermiques de type Enhanced Geothermal System (EGS), du comportement mécanique des zones de failles recoupant le puits sur la réponse hydraulique du réseau de fractures 3D. Dans ce but, un modèle 3D, basé sur la méthode des éléments distincts et dans lequel les zones de failles recoupant le puits sont modélisées par des fractures numériques 2D, est mis en œuvre. Les modélisations présentées ici visent à caractériser l'influence du comportement mécanique (type de comportement, hétérogénéité) sur la cinétique de la stimulation hydraulique, ainsi que sur son effet spatial autour du puits.

MOTS CLEF

Stimulation hydraulique de puits, comportement mécanique de zones de faille, modèle 3D couplé hydromécanique.

INTRODUCTION

Pour le développement de l'exploitation géothermique de type Enhanced Geothermal System (EGS), la phase de stimulation conditionne grandement le succés du projet ; en effet, elle a pour objectif d'augmenter l'injectivité et la productivité des puits et doit permettre d'assurer la connexion entre les puits d'injection et de production garantissant ainsi la viabilité technique et économique de l'échangeur. Pour le site EGS de Soultz-sous-Forêts (France), parmi différentes techniques de stimulation, la stimulation hydraulique a été utilisée à cette fin en provoquant une augmentation irréversible de la perméabilité autour des puits. Dans ce type de réservoirs fracturés, le but des stimulations hydrauliques est de réactiver, plus spécifiquement en cisaillement, des structures hydrauliques pré-existantes (fractures, zones de failles *etc.*) dans le socle cristallin. La compréhension des phénomènes physiques durant la stimulation hydraulique est cruciale pour optimiser cette technologie et pour contrôler/limiter les risques associés (viabilité technique et économique des puits, sismicité induite *etc.*). C'est notamment le cas pour la relation entre le comportement mécanique des structures stimulées et les conséquences sur le comportement hydraulique dans un contexte tectonique spécifique.

La modélisation numérique des couplages hydromécaniques au sein des milieux fracturés (Rutqvist *et al.*, 2003) est un outil précieux pour améliorer la compréhension des mécanismes physiques mis en œuvre lors de la stimulation hydraulique. Parmi les différentes approches numériques, la méthode des éléments distincts est particulièrement adaptée pour la modélisation du comportement des roches fracturées. Un modèle numérique 3D a été développé. Il permet de modéliser les écoulements de fluide au sein de fractures déformables, entourées par une matrice rocheuse déformable et imperméable, et ainsi de caractériser la réponse hydromécanique du réseau de fractures en fonction de leurs orientations, de leurs interconnexions et des contraintes *in situ.* Le modèle prend en compte les fractures et zones de failles identifiées comme étant les zones d'accès du fluide à l'échangeur géothermique dans la partie ouverte du puits. Pour les déterminer, les seules données et mesures utiles sont celles réalisées au puits par les diagraphies et techniques d'imagerie de puits. Une hypothèse forte du modèle consiste à modéliser ces zones d'accès à l'échangeur par des fractures déterministes 2D interceptant le puits, alors que ce sont en réalité des structures géologiques complexes (Faulkner *et al.*, 2003) avec une épaisseur variable et une extension de part et d'autre du puits indéterminée. Les lois de comportement prises en compte pour ces fractures, notamment les lois de cisaillement et de dilatance associée, vont permettre de modéliser la création d'ouvertures hydrauliques irréversibles dues aux cisaillements induits par les paliers de surpressions hydrauliques lors de la stimulation hydraulique.

Cependant, la validation du comportement hydromécanique des plans de fracture à cette échelle, représentant des zones de faille, est toujours une question ouverte alors que dans le même temps les données nécessaires sont manquantes : les seules données sont les logs de débit-métrie mesurés lors des paliers de la stimulation hydraulique ainsi que les évènements micro sismiques enregistrés par les stations géophysiques. Partant de ce constat, l'objet de ce papier est de se focaliser sur l'impact du comportement mécanique de ces zones de failles afin d'approfondir la compréhension des mécanismes au cours de la

stimulation hydraulique. Pour se faire, les résultats de modèles prenant en considération différentes hypothèses prises à priori sur le comportement mécanique des zones de failles sont présentés. L'implication sur la réponse hydromécanique et en particulier sur la localisation des chemins d'écoulement créés au sein du réseau fracturé est présentée.

MODELE 3D POUR LA STIMULATION HYDRAULIQUE

Le modèle 3D pour simuler le comportement du réservoir fracturé autour de la partie ouverte du puits lors de la stimulation hydraulique est réalisé avec le code 3DEC© (Itasca, 2008), basé sur la méthode des éléments distincts. Initialement ce code a été développé pour la modélisation des problèmes mécaniques 3D dans les roches fracturées. Dans le cadre de nos travaux, des procédures et des adaptation ont été mises en œuvre afin de modéliser les processus hydromécaniques dus à l'écoulement de fluide dans des joints déformables. Ainsi, il permet de considérer les interactions entre les phénomènes mécaniques (déformations, contraintes, déplacements) et hydrauliques (pressions, débits, ouvertures hydrauliques) au sein d'une matrice rocheuse découpée par des discontinuités : les joints et les blocs représentant la matrice rocheuse sont déformables tandis que les écoulements ont lieu dans les discontinuités, les blocs étant considérés comme imperméables. Cette hypothèse est acceptable pour des réservoirs géothermiques faillés tels que celui de Soultz-sous-Forêts pour lesquels la perméabilité matricielle des granites le contituant est négligeable au regard de celle des fractures et surtout des zones de failles.

Description du modèle géométrique

Comme mentionné plus haut, le fait de représenter les zones de failles intersectant le puit par des joints 2D plans constitue une hypothèse forte du modèle. En effet, ces zones de failles, identifiées par des techniques de diagraphie et d'imagerie en puits (UBI) et sièges des écoulements et des échanges avec le réservoir, sont des structures géologiques 3D complexes d'une épaisseur variable et d'une extension inconnue de part et d'autre du puits. Pour modéliser la stimulation d'un puits, le modèle géométrique pris en compte est un parallélépipède centré sur le puits et découpé par des « fractures numériques » (appelées fractures dans la suite du papier) représentant les zones de failles majeures intersectant la partie ouverte du puits, les blocs formés par le découpage des joints représentant la matrice rocheuse non fracturée. Dans le cas du modèle géométrique pour le puits GPK4 de Soultz-sous-Forêts (Figure 1), la taille du parallélépipède est de 400 m × 400 m horizontalement pour une hauteur de 1000 m et neuf fractures sont prises en compte (Tableau 1). Ces neuf zones de failles ont été identifiées comme majeures à la vue des imageries en puits et des tests d'injection (mesure de débitmétrie réalisée sur le trou ouvert du puits lors de tests d'injection). Le puits est modélisé par l'ensemble des nœuds du maillage correspondant aux intersections de la droite représentant le trou ouvert du puits avec les différentes fractures prises en compte. Les conditions d'injection sont appliquées sur ces nœuds de maillage. Concernant la discrétisation géométrique, les blocs sont discrétisés en éléments tétrahèdriques et les plans d'écoulement en domaines élémentaires triangulaires. Afin d'avoir une description fine des phénomènes, notamment dans les zones de forts gradients, la discrétisation géométrique est raffinée dans la zone entourant le puits.

Tableau 1 – Caractéristiques géométriques des fractures prises en compte.

Identification des fractures	Direction (°)	Pendage (°)	Direction de pendage (°)	Profondeur (m)
FZ1	4	86	NW	-4553
FZ2	11	83	NW	-4651
FZ3	2	80	SW	-4698
FZ4	167	85	SW	-4735
FZ5	165	75	NE	-4774
FZ6	147	66	NE	-4797
FZ7	165	69	SW	-4824
FZ8	173	70	NW	-4858
FZ9	20	78	NW	-4959

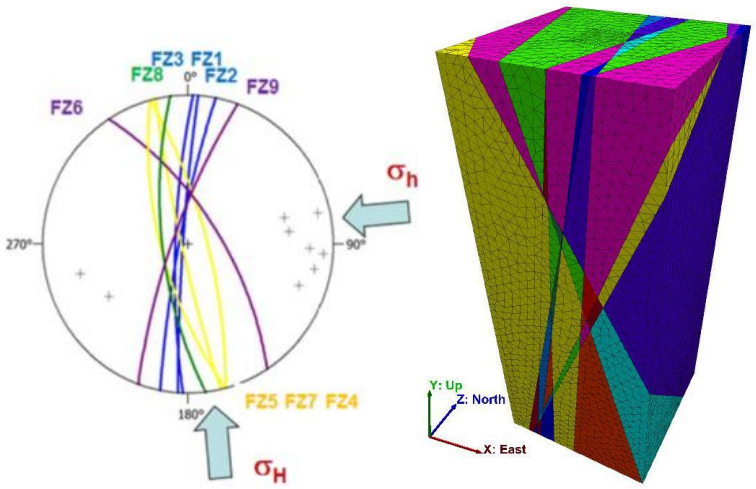


Figure 1 – Modèle géométrique 3D pour la stimulation du puits GPK4.

Conditions initiales et aux limites

Le champ de contraintes *in situ* (contraintes exprimées en MPa) est le suivant :

$$\sigma_h = (0{,}54 \pm 0{,}02)*\sigma_v \quad (1)$$

$$\sigma_H = (0{,}95 \pm 0{,}05)*\sigma_v \quad (2)$$

$$\sigma_v = \sigma_{v0} + 0{,}0255*(z - 1377) \quad \text{avec } \sigma_{v0} = 1377*0{,}024 \quad (3)$$

, où z est la profondeur en m, σ_h et σ_H sont respectivement les contraintes principales horizontales mineure et majeure et σ_v la contrainte principale verticale. La direction de la contrainte principale horizontale majeure σ_H est N175°E ± 6°.

La pression initiale des fluides interstitiels dans les fractures, p (en MPa), est supposée hydrostatique suivant la loi :

$$p = \rho*g*z \quad (4)$$

, où ρ et g sont respectivement la masse volumique du fluide en $kg.m^{-3}$, et la gravité en $m.s^{-2}$.

L'état de chargement initial en contrainte effective du modèle (Figure 2) est obtenu en appliquant des conditions de chargement mécanique aux limites mixtes, en déplacements bloqués et en contraintes imposées les faces du modèle, et en appliquant la pression de fluide hydrostatique sur l'ensemble des éléments.

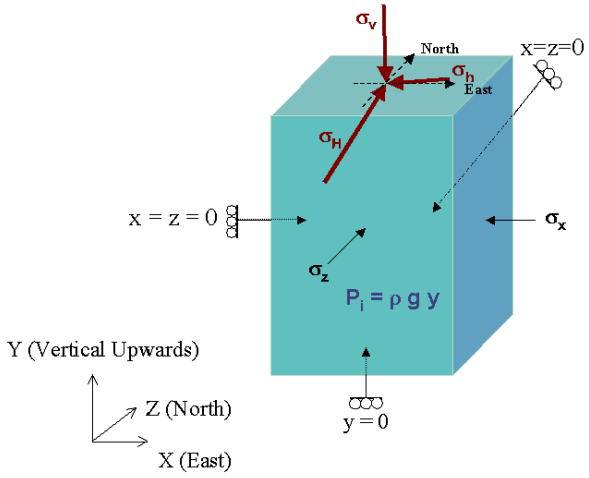


Figure 2 – Conditions aux limites.

Modélisation numérique de la stimulation hydraulique

Initialement, l'ensemble du modèle est équilibré mécaniquement : l'ensemble des contraintes effectives au sein du réseau de fractures et des contraintes dans la matrice rocheuse imperméable est à l'équilibre avec les champs de déplacements admissibles sur l'ensemble du modèle. Afin de modéliser la stimulation hydraulique, des paliers de surpression sont appliqués aux nœuds modélisant le puits. Ces paliers de surpression vont déstabiliser mécaniquement le modèle. Un algorithme de progression hydromécanique permettant d'atteindre un nouvel état d'équilibre est suivi : il alterne des cycles de calcul mécanique visant à équilibrer le système contraintes-déplacements et des cycles hydrauliques visant à équilibrer, dans les mailles 2D des fractures, les débits entrant et sortant et la pression du fluide. L'algorithme est optimisé pour gérer l'alternance des cycles mécaniques et hydrauliques en fonction de la prédominance de l'un ou l'autre des phénomènes. Pour chacun des paliers de stimulation hydraulique, le calcul s'arrête lorsque le système est équilibré mécaniquement et que l'ensemble des débits de fluide sortant par les différentes faces du modèle est égal à celui total injecté aux nœuds du puits.

Comportement mécanique de la matrice

La matrice rocheuse imperméable est supposée avoir un comportement mécanique élastique isotrope. Les propriétés mécaniques des blocs, prises en compte pour modéliser le granite autour du puits GPK4, sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2 – Propriétés mécaniques des blocs.

Densité (kg/m^3)	Module d'Young (MPa)	Coefficient de Poisson
2680	52000	0,29

Comportement hydraulique des fractures

L'écoulement du fluide au sein des fractures est supposé être laminaire monophasique et obéir à la loi cubique :

$$Q_f = -\frac{\rho g}{12\,\mu} a^3 \frac{\Delta h}{L} \tag{5}$$

où Q_f est le débit dans la fracture (m^3/s), pour une fracture de largeur unitaire et d'ouverture hydraulique équivalente a, $\Delta h/L$ est le gradient de charge hydraulique pour une longueur L d'écoulement, ρ et μ étant respectivement la densité et la viscosité dynamique du fluide, et g la gravité.

Comportement mécanique des fractures

La loi de comportement des fractures du modèle est un élément clé dans la stimulation hydraulique d'un réseau de zones de failles. L'augmentation irréversible de la transmissivité des zones de faille provient essentiellement des déplacements en cisaillement qu'elles subissent et du phénomène de dilatance qui se produit alors, les déplacements normaux dus à la pression dans la fracture étant réversibles.

La réponse hydraulique du système sera très fortement liée à son comportement mécanique, en particulier à la dilatance pour les aspects irréversibles, et il semble intéressant d'étudier les répercussions d'un changement de loi de comportement sur la réponse hydraulique. Deux lois de comportement sont utilisées dans cette étude et rendent compte de la dilatance des joints : une loi élastoplastique associée à un critère de type Mohr-Coulomb, et une loi de type pic-résiduelle appelée Continuously Yielding Joint Model (CYJM, Itasca, 2008).

Le critère de Mohr-Coulomb (MC) introduit un seuil de contrainte tangentielle τ_{max} au-delà duquel les déplacements de cisaillement u_s deviennent irréversibles. En deçà du seuil, une loi élastique linéaire agit sur le joint (Figure 3a) :

$$\begin{cases} \tau_s = k_s u_s & u_s \le \tau_{\max} / k_s \\ \tau_s = \tau_{\max} & u_s > \tau_{\max} / k_s \end{cases} \quad (6)$$

où τ_{max} [Pa] et k_s [Pa.m^{-1}] sont la contrainte et la raideur tangentielles.

Le seuil dépend de la contrainte normale σ_n:

$$\tau_{\max} = c + \sigma_n \tan \phi \quad (7)$$

où c [Pa] est la cohésion et ϕ [°] l'angle de frottement.

L'ouverture du joint admet une composante élastique et une composante en dilatance :

$$u_n = u_n^{el} + u_n^{dil} = (\sigma_n + \Delta P) / k_n + \tau_s \tan \psi \quad (8)$$

où u_n, u_n^{el} et u_n^{dil} [m] sont respectivement le déplacement normal, et ses composantes élastique et en dilatance. k_n [Pa.m^{-1}] est la raideur normale, ΔP [Pa] la surpression hydraulique, et ψ [°] l'angle de dilatance.

La dilatance étant un phénomène irréversible, elle ne se produit que lorsque la fracture est en phase de glissement (quand $u_s > \tau_{max}/k_s$, voir équation 6). Du point de vue physique, la dilatance atteint un maximum lorsque l'état de friction résiduel est atteint. Dans le modèle, un déplacement limite u_s^c est fourni, au-delà duquel la dilatance est constante (Figure 3c).

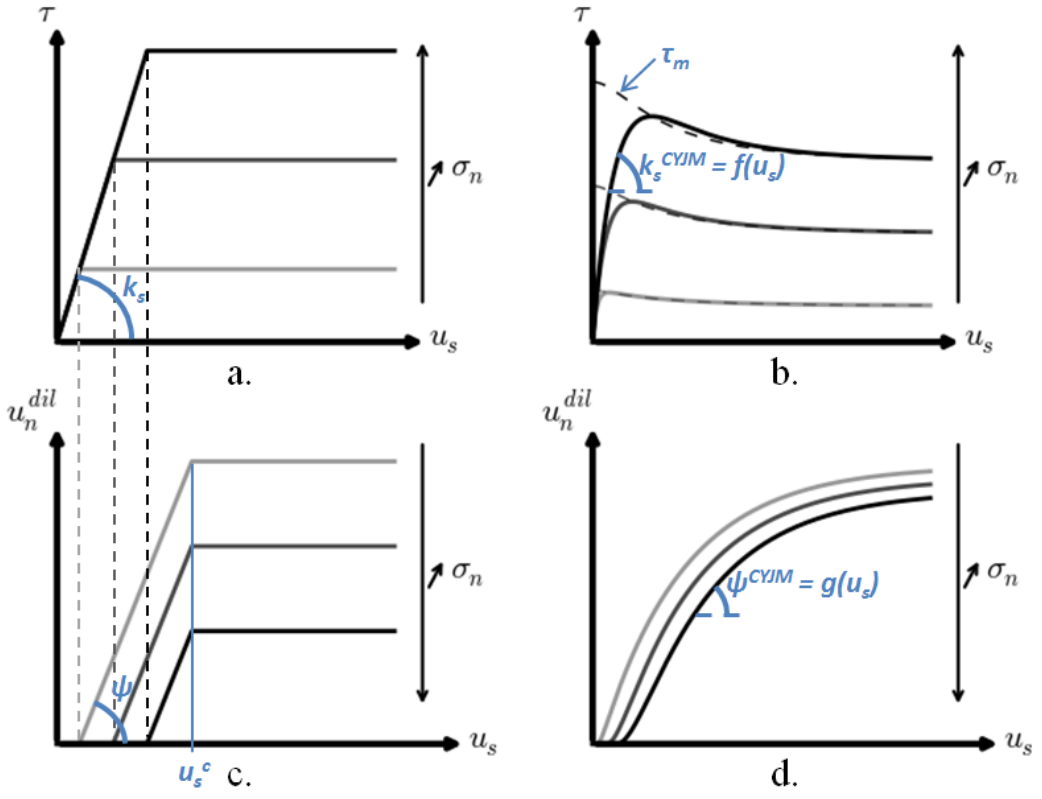


Figure 3 – Comparaison des deux lois de comportement étudiée : a. loi de Mohr-Coulomb et c. dilatance associée. b. Loi CYJM et d. dilatance associée.

Bien que le modèle élastoplastique avec le critère MC rende compte de l'essentiel de ce qui est attendu dans le comportement (irréversibilité et dilatance), elle n'exprime pas du tout la phase de l'altération de la résistance au csaillement du joint. La transition entre les phases linéaire et résiduelle est immédiate, ce qui est une approximation drastique du comportement réel. Le code de calcul 3DEC© propose une loi de type pic-résiduelle, la loi CYJM, où le module de cisaillement apparent k_s^{CYJM} rend compte de l'endommagement progressif du contact (qui conduit à une perte de linéarité de la loi de comportement) et de la phase de relaxation (qui donne l'aspect pic-résiduel de la loi de comportement). La Figure 3b montre l'allure de la relation, et sa dépendance à la contrainte normale σ_n.

Dans la loi CYJM, l'évolution du cisaillement τ est guidée par une contrainte « cible » τ_m. Cette contrainte cible affecte la raideur apparente du joint *via* un facteur F :

$$\tau_s = k_s^{CYJM} u_s = F k_s u_s \tag{9}$$

où F [-] est un facteur correcteur rendant compte de l'endommagement progressif et du comportement post-pic.

F est inversement proportionnel à la contrainte cible τ_m. Il est très proche de 1 initialement (comportement élastique), puis va se réduire et s'inverser (comportement au pic) pour tendre asymptotiquement vers zéro (comportement résiduel).

$$F = \left(1 - \tau / \tau_m\right)/(1 - r) \tag{10}$$

où le paramètre r, calculé par le code, permet de restaurer la raideur élastique lors de la décharge.

τ_m introduit la dépendance à la contrainte normale :

$$\tau_m = \sigma_n \tan \phi_m \tag{11}$$

où ϕ_m [°] est l'angle de friction cible.

L'angle de friction cible rend compte de ce que la friction se dégrade au cours du cisaillement, et suit une décroissance exponentielle. Cette allure se répercute sur celle de τ_m, qui décroît également lorsque u_s augmente (voir les courbes en pointillés de la Figure 3b).

$$\begin{cases} \phi_m = (\phi_{ini} - \phi_{res}) Exp\left(u_s^p / R\right) + \phi_{res} \\ \\ u_s^p = \int_{us} (1 - F)\, du_s \end{cases} \tag{12}$$

où ϕ_{ini} et ϕ_{res} [°] sont les angles de friction initial et résiduel, R [m] un paramètre exprimant la rugosité du joint, et u_s^p la part irréversible du déplacement u_s.

La loi CYJM tient compte du comportement dilatant du contact. La dilatance évolue également au cours du chargement en cisaillement : nulle avant la phase irréversible, elle diminue petit à petit (dégradation du contact), pour tendre asymptotiquement vers une valeur nulle lors de la phase résiduelle (Figure 3d). La dilatance est contrôlée par l'angle de dilatance ψ^{CYJM}, qui est l'écart entre les angles de friction apparent et résiduel :

$$\psi^{CYJM} = \arctan(\tau / \sigma_n) - \phi_{res} \quad (13)$$

Bien que la loi CYJM soit avant tout une loi empirique, elle est cohérente avec les comportements des joints rocheux observés en laboratoire et elle présente l'avantage d'introduire des paramètres qui peuvent être reliés à un processus physique : ϕ_{ini} exprime la notion de friction statique, ϕ_{res} est la friction dynamique. R est lié à la longueur caractéristique des aspérités des épontes : si les aspérités sont petites (R faible), la friction se dégradera plus vite (décroissance plus rapide de τ_m, et donc entrée plus rapide en phase résiduelle).

Couplage hydromécanique

L'influence du comportement hydraulique des fractures sur le comportement mécanique est prise en compte avec l'intégration, dans le calcul du déplacement normal des fractures, de la variation de pression (équation 8). Inversement, l'influence de la réponse mécanique de la fracture sur l'écoulement est prise en compte en faisant varier l'ouverture hydraulique en fonction du déplacement normal de la fracture :

$$a = a_0 + u_n \quad (14)$$

où a_0 est l'ouverture hydraulique initiale.

Afin de borner l'augmentation de l'ouverture hydraulique, une valeur maximale, a_{max}, de cette dernière doit être fixée.

ETUDE DE L'INFLUENCE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES FRACTURES

Motivation de l'étude

Pour caler l'ensemble des paramètres du modèle, y compris ceux régissant le comportement mécanique des fractures, les seules données disponibles sont les données hydrauliques mesurées (pressions, débits) lors de la stimulation hydraulique. Pour certains puits, comme c'est le cas pour le puits GPK4 du site de Soultz sous Forêts, ces données sont peu nombreuses avec seulement quelques couples de données reliant débit global injecté dans le puits et surpression associée lors de différents paliers. Une multitude de jeux de paramètres différents peuvent permettre d'ajuster ces données hydrauliques globales à l'échelle du puits sans pour autant permettre d'affirmer lequel est le plus adéquat. Partant de ce constat, le travail présenté ici a pour but d'étudier les réponses à la stimulation hydraulique obtenues par quatre modèles prenant en compte des comportements mécaniques différents pour les fractures tout en reproduisant tous les quatre le comportement hydraulique global du puits.

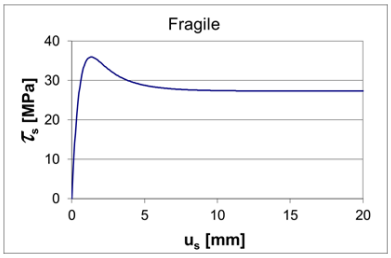
Modèles pris en compte

Deux aspects sont étudiés : l'homogénéité/hétérogénéité du comportement mécanique des différentes fractures et leur type de comportement, que l'on qualifiera de ductile ou fragile. Pour deux des modèles, l'ensemble des fractures est supposé avoir un comportement mécanique homogène, qualifié de ductile suivant une loi de Mohr Coulomb pour le modèle #1 (tableau 4) et fragile suivant une loi CYJM pour le modèle #2 (Modèle #2 dans le tableau 5). Pour les modèles #3 et #4, une différenciation du comportement mécanique au sein de l'ensemble des fractures est prise en compte en considérant que certaines fractures ont un comportement fragile et d'autres un comportement ductile. Pour réaliser la ségrégation dans l'ensemble des fractures entre ces deux types de comportement, deux hypothèses sont considérées :

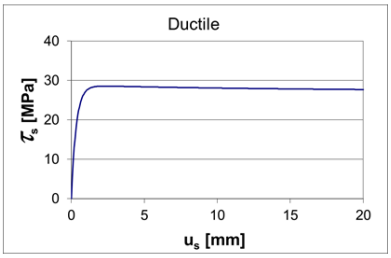
- le modèle #3 s'appuye sur les imageries de puits réalisées et plus spécifiquement des images des zones de failles en paroi du trou ouvert. Il est supposé que les zones de failles présentant une épaisseur plurimétrique à décamétrique avec une densité de fracturation/brechification importante se comportent de façon ductile alors que celles moins épaisses (centimétriques à métriques) et présentant une fracturation moins dense, plus individualisée, se comportent de manière plus fragile ;

- le modèle #4 est basé sur une extrapolation du comportement mécanique en cisaillement en fonction de la contrainte normale observé en laboratoire sur des fractures uniques. Il montre, un comportement ductile sous faibles contraintes normales constantes et fragile sous des contraintes normales constantes plus élevées. En fonction du niveau de contrainte normale s'appliquant sur les fractures du modèle, dépendant de leur orientation par rapport au tenseur de contraintes *in situ*, nous considérons ainsi que les fractures soumises aux plus faibles contraintes normales se comportent de façon ductile alors que les autres ont un comportement fragile.

Tableau 3 – Répartition des fractures par type de comportement pour les modèles #3 et #4.



Nom de la fracture	Modèle #3	Modèle #4
FZ1	Fragile	Ductile
FZ2	Fragile	Ductile
FZ3	Ductile	Ductile
FZ4	Ductile	Ductile
FZ5	Fragile	Ductile
FZ6	Fragile	Fragile
FZ7	Ductile	Ductile
FZ8	Fragile	Ductile
FZ9	Fragile	Ductile



Pour les modèles #3 et #4, les procédures numériques développées ne permettant pas d'imposer dans le même modèle la loi de comportement Mohr Coulomb et la loi de comportement CYJM, l'ensemble des fractures suit la loi CYJM mais avec deux jeux de paramètres différents : un ductile (Mod. ductile dans le tableau 5) limitant l'effet de pic et de comportement résiduel et un fragile (Mod. fragile dans le tableau 5) avec un pic prononcé.

Tableau 4 – Paramètres de la loi de Mohr Coulomb (modèle #1).

k_n [MPa/m]	k_s [MPa/m]	c [MPa]	ϕ [°]	ψ [°]	u_s^c [mm]
80 000	80 000	0	45	1	10

Tableau 5 – Paramètres de la loi CYJM.

	k_n [MPa/m]	k_s [MPa/m]	ϕ_{ini} [°]	ϕ_{res} [°]	R [mm]
Modèle #2	80 000	80 000	50	44	2,2
Mod. ductile	10 000	10 000	46,5	45	15
Mod. fragile	80 000	80 000	60	45	2

Pour les quatre modèles, le comportement hydraulique des fractures est homogène pour l'ensemble des neuf fractures. Concernant les paramètres hydrauliques (tableau 6), l'ouverture hydraulique initiale des fractures est identique pour les quatre modèles, seule l'ouverture hydraulique maximale diffère, permettant d'ajuster le comportement hydraulique global du puits aux mesures effectuées lors de la stimualtion hydraulique (Figure 4).

Tableau 6 – Paramètres hydrauliques.

	a_0 [mm]	a_{max} [mm]
Modèle #1	$2{,}5\ 10^{-3}$	$165\ 10^{-3}$
Modèle #2	$2{,}5\ 10^{-3}$	$165\ 10^{-3}$
Modèle #3	$2{,}5\ 10^{-3}$	$155\ 10^{-3}$
Modèle #4	$2{,}5\ 10^{-3}$	$135\ 10^{-3}$

Réponse hydraulique à la stimulation de GPK4

Dans le cas du puits GPK4, les données sont disponibles pour seulement deux paliers d'injection. Les quatre modèles donnent une réponse hydraulique globale sur l'ensemble du puits permettant d'encadrer les données de site, le modèle se rapprochant le plus étant le modèle #4. La principale différence entre les modèles est l'allure de la réponse hydraulique : les modèles considérant un comportement mécanique homogène pour l'ensemble des fractures (modèles #1 et #2) montrent (Figure 4) une allure en deux parties distinctes, la première jusqu'au palier de surpression de 9 MPa correspondant à la partie élastique dans laquelle les débits restent faibles (inférieurs à 5 $l.s^{-1}$) puis la seconde *quasi* linéaire, lorsque le critère de rupture est atteint, dans laquelle les débits augmentent beaucoup plus rapidement. Il est à noter qu'il n'y a pas de différence notable pour cette réponse globale entre les deux modèles homogènes au niveau du comportement mécanique. La réponse hydraulique globale du modèle #4, pour lequel une seule fracture (fracture 6) se comporte différemment des autres, présente une allure similaire à celles des modèles #1 et #2 : une première partie avant le seuil de glissement suivie d'un point d'inflexion puis d'une partie *quasi* linéaire d'évolution de la surpression hydrauliqe en fonction du débit d'injection. Par contre, dans le cas du modèle #4, du fait des paramètres du modèle ductile (tableau 5) on constate les différences suivantes avec les modèles #1 et #2:

- les raideurs élastiques étant plus faibles, l'évolution de la surpression en fonction du débit est moins pentue avant le point d'inflexion car les ouvertures hydrauliques sont plus importantes ;
- le seuil de glissement étant atteint plus rapidement, le point d'inflexion se produit pour un palier de surpression hydraulique plus faible (3 MPa) ;
- du fait de la rugosité (R) plus importante l'évolution de la surpression en fonction du débit après le point d'inflexion est plus pentue, les ouvertures hydrauliques augmentant plus faiblement après le seuil.

La réponse hydraulique du modèle #3 (Figure 4) est sensiblement différente de celle des trois autres modèles. En effet on constate un amortissement plus continu de la surpression hydraulique sans point d'inflexion prononcé. Du fait de l'hétérogénéité du modèle, la réponse hydraulique se situe entre celles des modèles #1 et #2 et celle du modèle #4 et on constate un mixte entre l'effet des paramètres du modèle fragile (raideurs élastiques fortes, rugosité faible) et ceux du modèle ductile (raideurs élastiques faibles, rugosité forte).

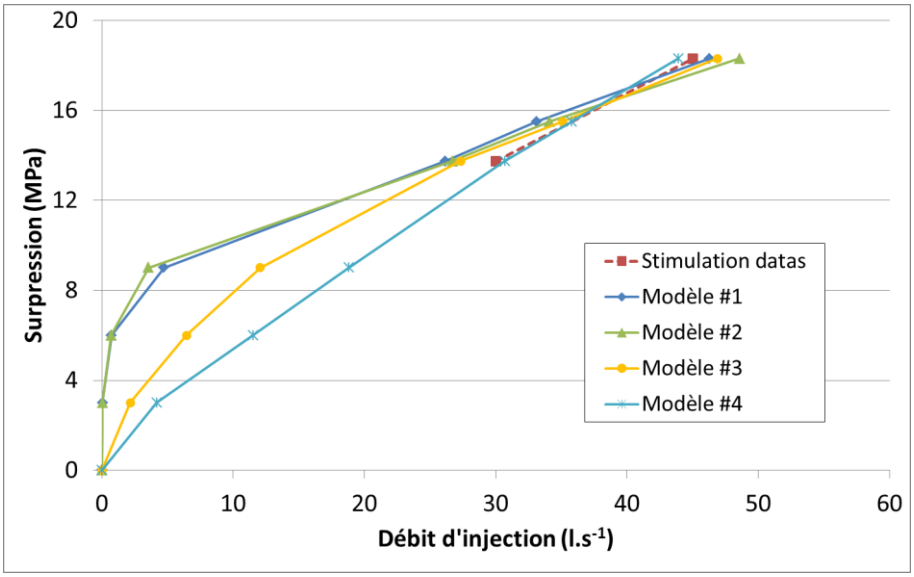


Figure 4 – Réponse hydraulique globale du puits : comparaison des modèles avec les données de site.

La Figure 5 illustre les répartitions des débits dans les fractures pour chaque palier (en pourcentage du débit total au puits) pour chacun des modèles. Les modèles homogènes (modèle #1 et #2)

ont une répartition des débits homogène excepté pour le palier 9 MPa (point d'inflexion de la courbe hydraulique sur la Figure 4) du modèle #1 pour lequel les fractures 7 et 8 prennent un pourcentage du débit total plus important que les autres fractures (de deux à trois fois). Concernant le modèle #3, les fractures ductiles (fractures 3, 4 et 7) prennent à elles trois l'ensemble du débit pour les paliers de surpression les plus faibles, ce qui s'explique par leurs raideurs élastiques plus faibles. Puis, on observe une participation progressive croissante des autres fractures. Pour le modèle #4, à l'inverse, la fracture 6 ayant un comportement plus fragile, a des raideurs élastiques plus importantes que toutes les autres fractures et par conséquent ne prend aucun débit pour les paliers de surpression les plus faibles ; puis progressivement à partir du palier de 13,75 MPa sa contribution devient équivalente à celles des autres fractures. Il est intéressant de noter que pour les quatre modèles la répartition du débit s'homogénéise pour les paliers de surpression les plus importants et que pour le palier de 18,3 MPa les neuf fractures contribuent de façon équivalente au drainage du débit total injecté.

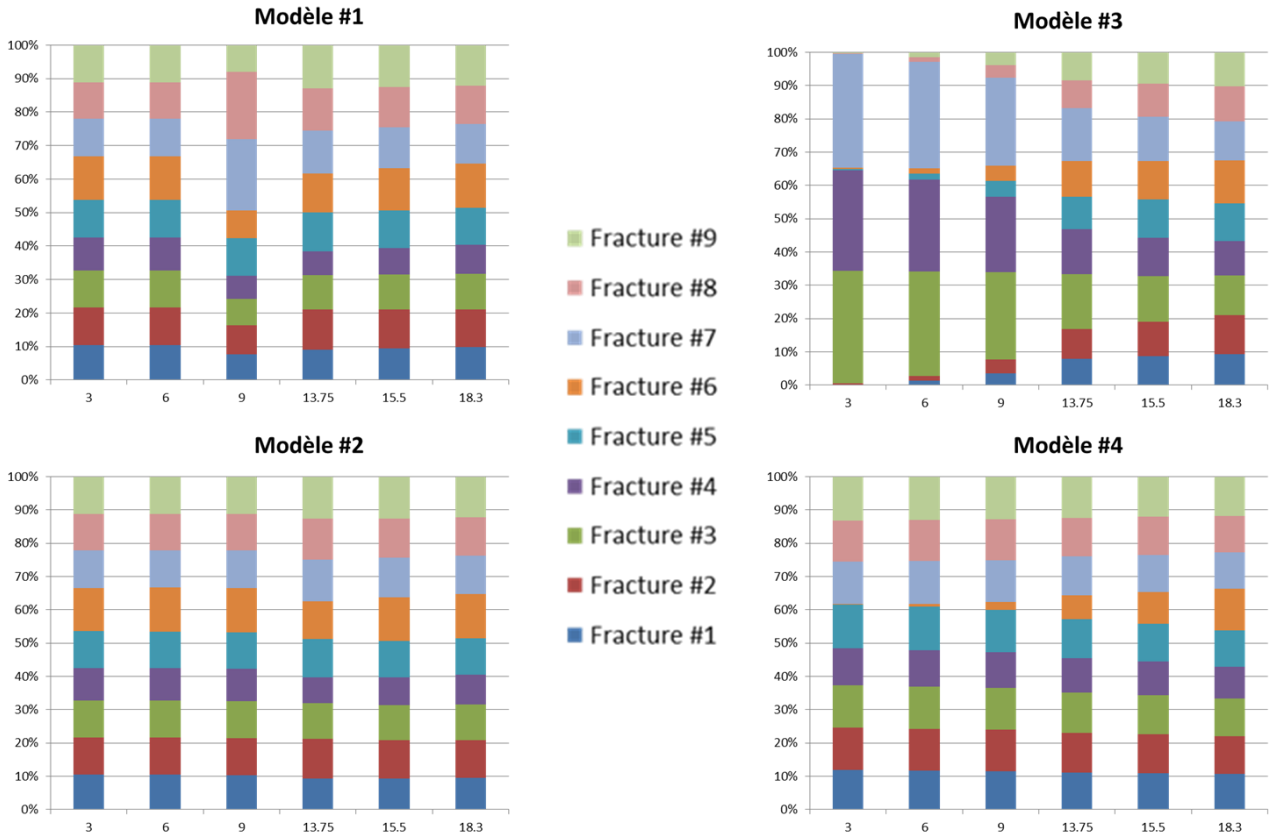


Figure 5 – Répartition, en pourcentage du débit total, des débits dans les fractures à chaque palier de surpression (3, 6, 9, 13.75, 15.5 et 18.3 MPa) pour les quatre modèles.

Effet spatial de la stimulation de GPK4

Comme cela a été montré précédemment, l'influence du comportement mécanique que ce soit sur la réponse hydraulique globale mais également sur les répartitions du débit dans les fractures au cours de la stimulation hydraulique. Ces éléments indiquent que le comportement mécanique va influer sur la cinétique de la réponse hydraulique à la stimulation hydraulique du puits mais aussi sur les chemins d'écoulements favorisés. Afin d'approfondir la compréhension des mécanismes, il est important de caractériser la réponse spatiale du réseau 3D de fractures autour du puits à la stimulation hydraulique et les différences du fait du modèle de comportemant mécanique pris en compte. L'ouverture hydraulique post-stimulation, après fermeture du puits (*shut down*), des fractures est un paramètre intéressant pour caractériser l'effet de la stimulation hydraulique du puits et une augmentation de la perméabilité

irréversible dans les fractures. Afin de caractériser l'état post-stimulation du réservoir pour chacun des modèles, le *shut down* est simulé en appliquant un débit nul aux nœuds du puits. Lors de ce *shut down*, la partie élastique de l'ouverture hydraulique (soit, la contribution du déplacement normal élastique) s'annule et, seule, reste la partie irréversible de l'augmentation hydraulique (issue du déplacement normal par dilatance) due à la stimulation hydraulique.

Concernant l'influence du type de loi de comportement, en comparant les ouvertures hydrauliques après fermeture du puits obtenues avec le modèle #1 et le modèle #2 (illustrées Figure 6 pour les fractures 7 et 8), il semble que la prise en compte de la loi de Mohr Coulomb (modèle #1) conduise à des ouvertures hydrauliques plus étendues spatialement alors que la prise en compte de la loi CYJM (modèle #2) induise des ouvertures hydrauliques plus localisées. Concernant les valeurs de ces ouvertures hydrauliques, le spectre obtenu avec le modèle #1 est plus graduel alors que pour le modèle #2 la *quasi* totalité des ouvertures hydrauliques post stimulation correspondent à l'ouverture hydraulique maximale.

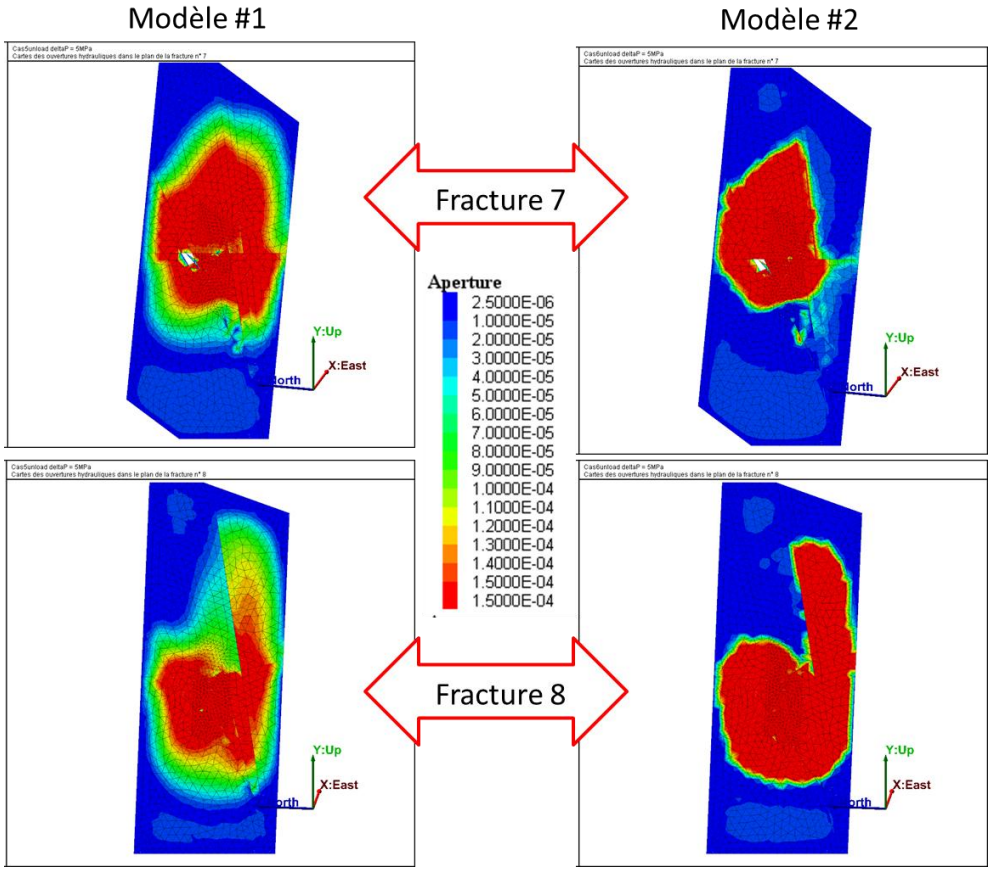


Figure 6 – Ouvertures hydrauliques post stimulation des fractures 7 et 8 pour modèles #1 et #2.

La Figure 7 montre les ouvertures hydrauliques post stimulation dans les fractures 6, 7 et 8 pour les modèles #3 et #4. Ces trois fractures ont des ouvertures hydrauliques représentatives des autres fractures des modèles en fonction de leur comportement respectif: fragile pour la fracture 6, ductile pour la fracture 7 et pour la fracture 8 alternativement fragile dans le modèle #3 et ductile dans le modèle #4. Pour les fractures dont le comportement est fragile, à l'instar de la fracture 6 et de la fracture 8 du modèle #3), les ouvertures hydrauliques irréversibles sont *quasi* inexistantes et très localisées autour du puits. Pour les fractures considérées comme ayant un comportement ductile, à l'instar de la fracture 7 ainsi que la fracture 8 du modèle #4, les ouvertures hydrauliques irréversibles sont plus étendues spatialement que pour les fractures fragiles ; par contre les zones pour lesquelles elles sont maximales sont également assez localisées autour du puits. Dans le cas de la fracture 7, on constate que l'étendue des ouvertures hydrauliques maximales persistantes est plus importante dans le modèle #3 que dans le modèle #4. Dans ce

dernier toutes les fractures, à l'exception de la fracture 6, sont ductiles et elles encaissent toutes l'effet de la stimulation hydraulique, ainsi, la réponse hydromécanique et en particulier l'augmentation de l'ouverture hydraulique due à la dilatance est répartie sur huit fractures alors que dans le modèle #3 seules les fractures 3, 4 et 7 sont ductiles et vont majoritairement reprendre l'effet de la stimulation hydraulique.

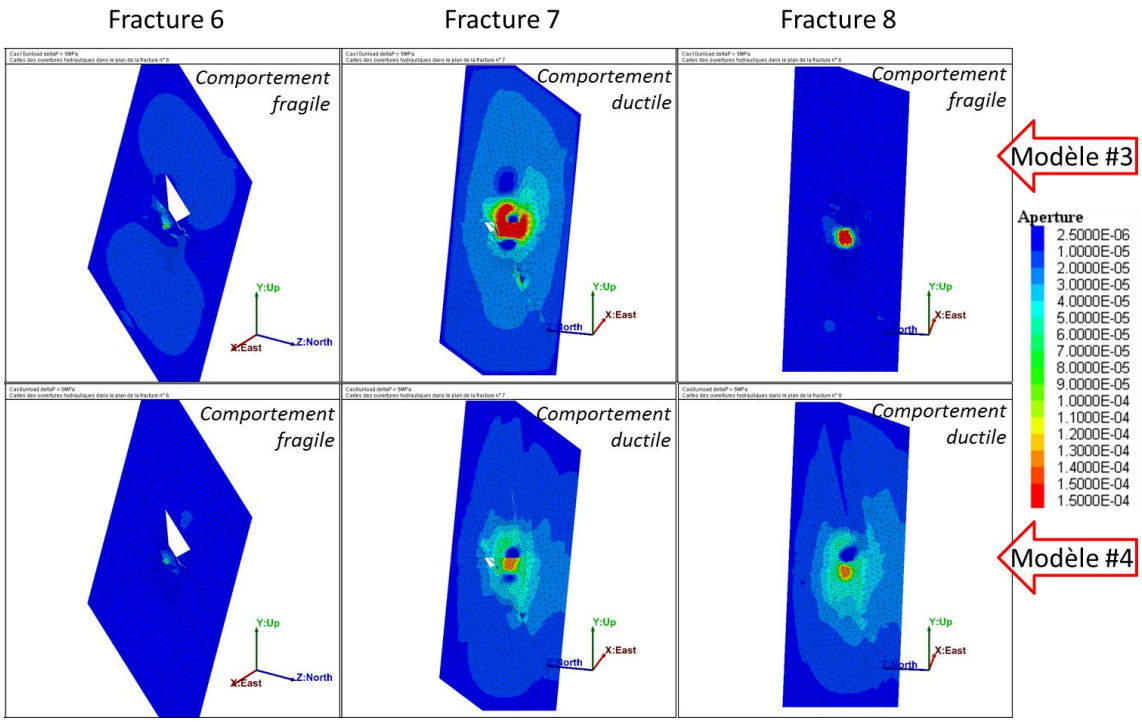


Figure 7 – Ouvertures hydrauliques post stimulation des fractures 6, 7 et 8 pour les modèles #3 (en haut) et #4 (en bas).

Afin de caractériser l'effet de la stimulation hydraulique dans l'espace autour du puits, la représentation 3D du halo d'ouvertures hydrauliques irréversibles dans les fractures est intéressante. Cependant, du fait de la complexité du réseau due à l'imbrication des fractures entre elles (Figure 1), il est plus lisible de représenter les projections de ce halo sur les faces du modèle. La Figure 8 illustre pour les quatre modèles la projection, sur les faces Ouest, Nord et inférieure du modèle, des ouvertures hydrauliques irréversibles dans l'ensemble des fractures qui sont supérieures à trente fois l'ouverture hydraulique initiale des fractures. On constate la grande disparité spatiale du halo, les modèles #1 et #2 montrant un impact spatial important de la stimulation hydraulique à l'inverse des modèles #3 et #4 pour lesquels le halo limité.

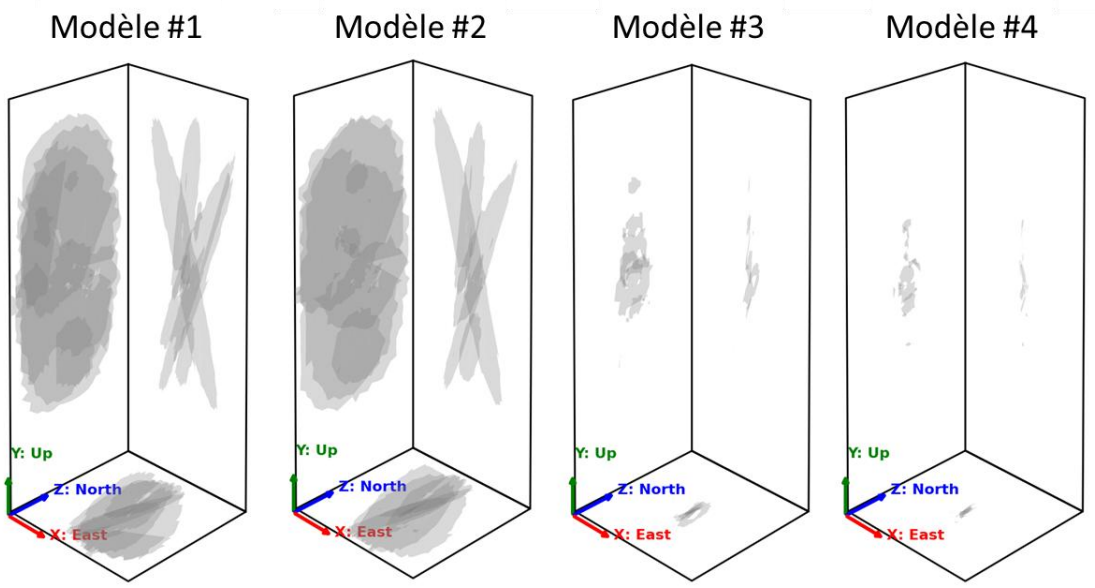


Figure 8 – Projection des ouvertures hydrauliques irréversibles supérieures à trente fois a_0 dans le réseau 3D de fractures.

CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Le modèle 3D DEM développé pour modéliser la stimulation hydraulique des puits dans les réservoirs géothermiques a été mis en œuvre ici pour mieux comprendre l'influence du comportement des zones de failles sur l'augmentation potentielle d'une perméabilité irréversible au voisinage du puits. Moyennant les hypothèses du modèle, tant géométriques que sur la physique, l'étude présentée a porté sur la modèlisation de la stimulation du puits GPK4 du site de Soultz-sous-Forêts pour lequel peu de données de puits permettent de contraindre et de caler le modèle. En particulier, l'étude a été focalisée sur l'influence du comportement mécanique des fractures 2D, représentant les zones de failles recoupant le puits, sur la réponse à la stimulation hydraulique du puits. Pour les modèles et les hypothèses retenues, les points suivant ont été identifiés :

- la **réponse hydraulique globale du puits** lors de la stimulation est **sensible à la prise en compte de l'hétérogénéité de comportement mécanique au sein de l'ensemble des fractures recoupant le puits**. Pour les modèles intégrant un comportement homogène (modèles #1 et #2) ou faiblement hétérogène (modèle #4), la réponse hydraulique à la stimulation présente une allure en deux parties avec un point d'inflexion caractérisant la limite entre le comportement élastique et le glissement irréversible des fractures. Pour ces modèles homogènes, les raideurs élastiques et la rugosité conditionnent les pentes des deux parties de la réponse hydraulique. Lorsque le modèle prend en compte une hétérogénéité de comportement mécanique entre les fractures, la réponse hydraulique globale a une allure différente montrant un amortissement en continu de la surpression hydraulique sans point d'inflexion identifiable ;
- pour les modèles prenant en compte une hétérogénéité de comportement mécanique, la **répartition du débit total dans les fractures est sensible à leur comportement mécanique pour les premiers paliers de stimulation hydraulique**: les fractures ayant un comportement ductile, caractérisé par des raideurs élastiques plus faibles, drainent un pourcentage plus important du débit total. Pour les paliers de stimulation hydraulique plus élévés, la répartition du débit total tend à s'équilibrer entre toutes les fractures malgré l'hétérogénéité de comportement mécanique ;
- concernant l'effet spatial de la stimulation, pour les modèles prenant en compte un **comportement mécanique homogène** pour toutes les fractures (modèles #1 et #2), la **loi de comportement considérée influe principalement sur l'étendue des ouvertures**

hydrauliques irréversibles après *shut down* et leurs gradients d'ouverture en périphérie : avec la prise en compte de la loi CYJM, les ouvertures hydrauliques irréversibles sont moins étendues spatialement qu'avec la loi de Mohr Coulomb par contre elles correspondent pour la plupart à l'ouverture hydraulique maximale;

- pour les **modèles prenant en compte une hétérogénéité de comportement mécanique** (modèles #3 et #4), le **modèle de la fracture influe fortement sur l'ouverture hydraulique irréversible** aprés *shut down* dans celle-ci : les fractures ductiles présentent des ouvertures hydrauliques irréversibles plus étendues que celles des fractures fragiles, pour lequelles elles sont principalement localisées autour du puits.
- Une **grande disparité spatiale du halo d'ouvertures hydrauliques irréversibles** est constatée entre les modèles prenant en compte un comportement mécanique homogène (modèles #1 et #2) et ceux prenant en compte un comportement mécanique hétérogène (modèles #3 et #4).

Il a ainsi pu être mis en évidence que des aspects tels que l'hétérogénéité du comportement mécanique au sein de l'ensemble des fractures et le type de comportement vont influencer à la fois la réponse hydraulique du puits (allure de la réponse globale du puits, répartition du débit dans les fractures) mais également l'effet spatial de la stimulation hydraulique, à travers notamment la répartition des ouvertures hydrauliques irréversibles dans l'ensemble du réseau et donc de la connectivité à distance des puits. Ces différents points montrent que pour quatres modèles, calés en se basant sur seulement quelques couples de données hydrauliques au puits, le comportement mécanique des fractures influe fortement la cinétique mise en œuvre lors de la stimulation hydraulique et par conséquent le résultat spatial de cette stimulation dans le réservoir fracturé autour du puits. La confrontation des résultats de ces modèles avec des données plus complètes mesurées lors de la stimulation hydraulique du puits, telles que la répartition des débits injectés par zone de failles lors des paliers de stimulation hydraulique ou les événements microseismicité mesurées, pourrait permettre de s'orienter sur l'un ou l'autre et ainsi amélorier la compréhension du puits et plus largement la gestion de l'échangeur géothermal.

Bien évidemment, en complément de ce type de modèle et de cette échelle, il est nécessaire de travailler sur la validation des lois de comportement et des paramètres à l'échelle des zones de failles rencontrées dans les réservoirs géothermiques. Si cette validation nécessaire pour les lois et paramètres mécaniques (Morris *et al.*, 2013), la notion d'ouverture hydraulique équivalente et la traduction en terme d'ouverture hydraulique des déplacements mécaniques à l'intérieur de ces zones de failles vont être des aspects cruciaux pour la validation de tels modèles.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'ADEME (Agence Française de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) pour son soutient actif dans le développement et la réalisation des travaux de recherche présentés.

REFERENCES

Faulkner, D. R., Lewis, A. C., Rutter, E. H. (2003). On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault –zones: field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain. *Tectonophysics, 367, 235 – 251*.

Itasca. 2008. 3DEC, Version 4.0, 3 Dimensional Distinct Element Code. User's Manual. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN.

Morris, J. P., Jocker, J., Prioul, R. (2013). Exploring alternative characterizations of fracture stiffness and their respective scaling behaviors. *47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, 23-26 June 2013.*

Rutqvist, J., & Stephansson, O. (2003). The role of hydromechanical modeling in fractured rock engineering. *Journal of Hydrology, 11*, 7-40. DOI10.1007/s10040-002-0241-5