

PREMIERE APPROCHE D'UNE STRATEGIE OPERATIONNELLE COMBINANT ARCHITECTURE DE PUITS ET STIMULATION HYDRAULIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT DES EGS

A FIRST APPROACH OF AN OPERATIONAL STRATEGY COMBINING WELL ARCHITECTURE AND HYDRAULIC STIMULATION FOR THE DEVELOPMENT OF EGS

Arnold BLAISONNEAU¹, Sylvie GENTIER¹, Théophile GUILLON¹, Mariane PETER¹
¹ BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, 45000 Orléans, France

RÉSUMÉ – Afin d'aider à ébaucher une stratégie opérationnelle pour l'exploitation géothermale de type EGS, une approche coordonnant architecture de puits et stimulation hydraulique, tout en s'assurant d'un minimum de risque mécanique au niveau de la foration des puits, est présentée. Cette approche est basée sur la conceptualisation des réservoirs géothermiques faillés/fracturés et l'utilisation de modèles numériques adaptés.

ABSTRACT – In order to draft an operational strategy for EGS development, an approach, combining well architecture and hydraulic stimulation, while ensuring a lower mechanical risk during the well drilling, is presented. This approach is based on the conceptualisation of faulted/fractured geothermal reservoirs and the use of adapted numerical models.

1. Introduction

L'exploitation géothermale de type EGS (Engineered Geothermal System) des systèmes hydrauliques profonds dans les contextes géologiques de fonds de bassins sédimentaires et de toits de socle est un enjeu majeur pour le développement à court et moyen terme de la géothermie profonde, notamment sur le territoire métropolitain. Afin de limiter les risques liés aux incertitudes potentielles concernant les perméabilités et les ressources disponibles et d'optimiser l'exploitation de ces dernières, différentes solutions sont envisagées, à ce jour, suivant le contexte géologique :

- la réalisation de forages déviés horizontaux dans la perspective de capter au mieux la ressource et maximiser les débits en sortie des puits dans le cas des fonds de bassins sédimentaires ;
- les stimulations hydrauliques et/ou chimiques à partir de puits déviés dont les trajectoires sont plus ou moins optimisées par rapport à la structure géologique du milieu dans le cas des toits de socle.

L'objectif du travail présenté ici est d'aider à ébaucher une stratégie opérationnelle coordonnant architecture de puits (orientation, position...) et stimulation hydraulique du réservoir en fonction des différents contextes géologiques et hydrauliques rencontrés tout en s'assurant d'un minimum de risque mécanique (stabilité des forages) au niveau de la foration des puits. En effet pour les situations étudiées, cet aspect est crucial du fait de la réalisation de forage à grande profondeur dans un environnement tectonique souvent très contractant.

2. Approche mise en œuvre

Le problème est abordé dans son ensemble en partant de la situation étudiée (fond de bassin ou socle) afin de définir la meilleure stratégie englobant à la fois les opérations de forage et de stimulation potentielle. Pour cela, une approche basée sur des modélisations numériques couplées hydromécaniques 3D de la stimulation hydraulique d'un puits au sein d'un réservoir géothermique fracturé est mise en œuvre. Le travail réalisé repose sur les étapes suivantes :

- **Définition des modèles conceptuels** : Pour chaque contexte géologique, un modèle conceptuel est établi, faisant le lien entre la géologie du site et le modèle numérique mis en œuvre. Il définit la taille du réservoir, les principaux types de roches rencontrées, les structures géologiques (zones de failles, fracture etc.) et leurs caractéristiques (densité, comportement hydraulique, comportement mécanique, persistance etc.) et le régime tectonique permettant d'estimer les contraintes au sein du réservoir (régime de faille normale, de chevauchement ou de décrochement) ;

- **Construction des modèles numériques et calculs** : à partir du modèle conceptuel, le modèle numérique 3D est réalisé avec le code 3DEC© (Itasca, 2008a). Il permet de simuler le comportement du réservoir fracturé autour de la partie ouverte du puits et les processus hydromécaniques mis en jeu lors de la stimulation hydraulique. A partir du modèle numérique établi, une série de calculs est réalisée en testant différentes orientations et trajectoires de puits au sein du réservoir fracturé ;

- **Identification des configurations optimales** : Les résultats obtenus sont analysés notamment pour mettre en évidence les effets de la stimulation hydraulique sur le réservoir fracturé tant d'un point de vue mécanique qu'hydraulique. Pour le contexte géologique étudié, l'architecture de puits optimale pour la stimulation hydraulique est identifiée, c'est-à-dire celle permettant de créer le maximum d'ouvertures hydrauliques irréversibles au sein du réseau de fractures ;

- **Pré-étude de la stabilité mécanique du puits à la foration** : Une fois la configuration optimale identifiée une pré-étude de la stabilité mécanique du puits lors de son creusement est réalisée. L'objectif est d'évaluer les risques de rupture mécanique potentiels lors du creusement du puits du fait de sa trajectoire, des contraintes *in situ* et du faciès de roche rencontré (les trois étant déterminés lors de l'étape précédente). Pour cela, un modèle numérique basé sur une approche particulière avec le code PFC2D© (Itasca, 2008b) est mis en œuvre afin d'étudier les ruptures induites dans la matrice rocheuse autour du puits par le déconfinement dû à la foration.

3. Application à un réservoir géothermal de toit de socle

Les différentes étapes de la méthodologie et les modèles mis en œuvre sont détaillés dans le cas de l'application à un réservoir de toit de socle en contexte de rift.

3.1. Modèle conceptuel du réservoir

La construction du modèle conceptuel est basée sur une étude bibliographique des données de sites existantes et par l'intégration de connaissances géologiques plus génériques. La Figure 1 illustre, pour le toit socle en contexte de rift, la démarche adoptée pour construire le modèle conceptuel de fracturation ; elle prend en compte des données de sites mesurées à différentes échelles, telles que les données géophysiques à l'échelle du réservoir ou les données mesurées en puits, ainsi que la connaissance de l'histoire tectonique permettant d'expliquer les structures en place et le régime de contraintes. Les différentes familles de fracturation sont définies (orientation, pendage) par cette analyse

structurale. L'approfondissement et l'interprétation de ces familles avec un modèle de Riedel (d'après Riedel, 1928 ; Katz et al., 2004) permet d'obtenir un modèle conceptuel de fracturation global cohérent, dans le temps (hiérarchisation des familles) et dans l'espace (volume à distance du puits, densité). Ce modèle de Riedel est un modèle géométrique 2D de réseau de fractures se développant dans une zone affectée d'un mouvement décrochant. Ces fractures sont classées en familles (dénommées Y, R et R', P et X, T) selon leur direction par rapport au cisaillement principal et fonction de l'angle de frottement de la roche ; ces familles sont hiérarchisées permettant ainsi de structurer géométriquement le modèle de fracturation.

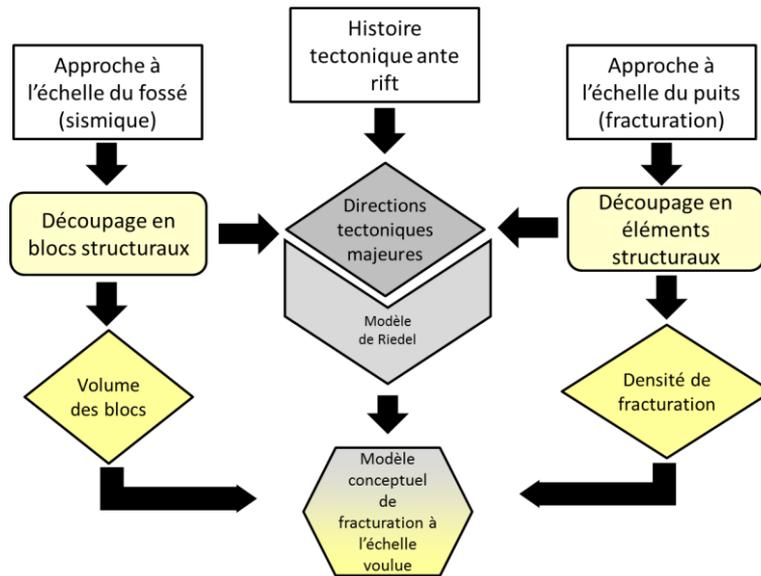


Figure 1 Schéma illustrant la démarche adoptée pour la construction du modèle conceptuel dans le cas du contexte de socle.

Pour le modèle présenté ici, les données de fracturation à l'échelle du fossé rhénan ont permis de réaliser une décomposition générale en blocs structuraux faisant apparaître les grandes directions tectoniques à l'échelle du fossé rhénan au niveau du toit du socle (Dezayes et al., 2014). A l'échelle du puits, le modèle conceptuel est focalisé sur un accident majeur hercynien qui a pu jouer au cours des phases tectoniques ultérieures. Il est basé sur les données issues du forage GPK3 (site EGS de Soultz sous Forêts) aux alentours de -4660 m de profondeur. La fracturation dans un linéaire d'un kilomètre autour du cisaillement principal a été réinterprétée en termes de directions de Riedel afin de déterminer les densités de fracturation de chacune des directions constituant le réseau. Cette réinterprétation a été ajustée et complétée avec les données concrètes disponibles dans la littérature et dans les forages réalisés à Soultz.

Le modèle conceptuel est complété avec la nature des formations géologiques traversées ainsi que les évaluations du tenseur des contraintes *in situ* réalisées (Tableau 1).

3.2. Modèle numérique

Le modèle 3D pour simuler le comportement du réservoir fracturé/faillé autour de la partie ouverte du puits lors de la stimulation hydraulique est réalisé avec le code 3DEC© (Itasca, 2008a), basé sur la méthode des éléments distincts. Le modèle numérique (Figure 2) intègre le modèle de fracturation (les fractures étant représentées par des joints 2D) et les faciès lithologiques définis dans le modèle conceptuel.

Le modèle permet de simuler le comportement du réservoir fracturé autour de la partie ouverte du puits et les processus hydromécaniques mis en jeu lors de la stimulation hydraulique. La matrice rocheuse imperméable a un comportement mécanique élastique isotrope et les joints répondent à une loi de comportement de type élastoplastique associée à un critère de Mohr-Coulomb. L'ouverture des joints admet une composante élastique et une composante irréversible en dilatance se produisant lorsque la fracture est en phase de glissement. L'écoulement du fluide au sein des joints est laminaire monophasique et obéit à la loi cubique. L'influence du comportement hydraulique des fractures sur le comportement mécanique est prise en compte avec l'intégration de la variation de pression dans le calcul du déplacement normal des fractures. 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 de la composante normale du déplacement de la fracture. Les différents modèles constitutifs ainsi que les paramètres utilisés dans cette étude sont détaillés dans le tableau 2 et correspondent à ceux utilisés pour les modélisations de la stimulation hydraulique du puits GPK4 de Soultz-sous-Forêts (voir Blaisonneau *et al.* 2015).

A partir de la connaissance du champ de contraintes *in situ* établie dans le modèle conceptuel, l'état de chargement en contrainte effective (en considérant des pressions interstitielles hydrostatiques) est appliqué dans le modèle numérique afin de reproduire l'état initial du réservoir. La trajectoire du puits au sein du modèle est donnée par un ensemble de segments de droite. Le puits « numérique » correspond à l'ensemble des nœuds du maillage des joints intersectés par ces segments de droite. Afin de modéliser la stimulation hydraulique, des paliers de surpression sont appliqués aux nœuds modélisant le puits ; pour cette étude les paliers de surpression suivants (en MPa) ont été appliqués {3; 6; 9; 13.75; 15.5; 18.3}, reprenant les valeurs de stimulation du puits GPK4 de Soultz-sous-Forêts. Pour plus de détail sur la réalisation des calculs et les aspects numériques le lecteur peut se reporter à Blaisonneau *et al.* (2015). A la suite de cette stimulation hydraulique, un calcul de déchargement est réalisé en annulant progressivement le chargement hydraulique appliqué sur les nœuds modélisant le puits et en laissant ainsi l'ensemble du modèle se rééquilibrer, ne subsistant que les phénomènes irréversibles au sein du modèle tels que les ouvertures hydrauliques résiduelles provenant de l'ouverture en dilatance.

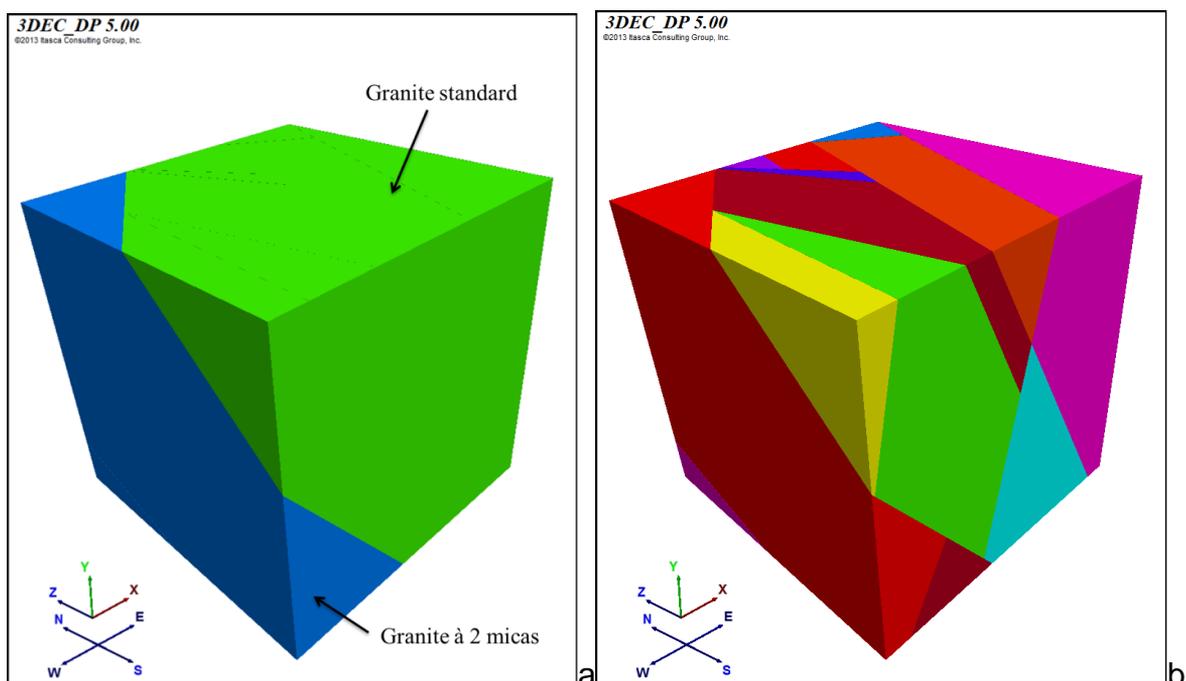


Figure 2 Modèle numérique du "réservoir" de socle : lithologie (a) et fracturation (b).

Tableau 1. Synthèse du modèle conceptuel.

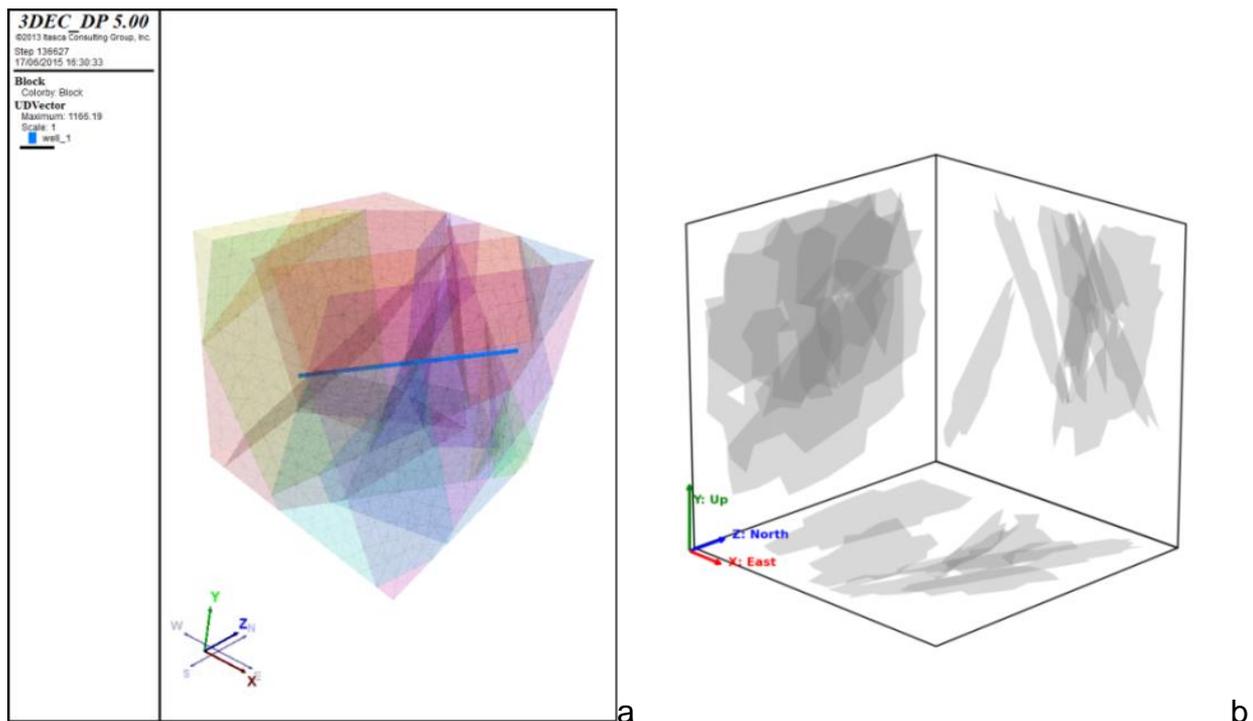
Dimension du bloc structural		
Volume du bloc : 1 km ³ (cube de 1x1x1 km) Altitude du toit du modèle : -4000 m, altitude du mur du modèle: -5000 m		
Lithologie		
Nature	Age	Epaisseur
Granite standard	Paléozoïque (334,0±3,8/-3,5Ma)	inconnue
Interface : N33°E-58°SE		
Granite à deux micas	Paléozoïque (327 ± 7Ma)	inconnue
Fracturation		
Granite standard	2 fractures R (direction moyenne du pendage N289°E) qui s'arrêtent sur le cisaillement principal Y	
	2 fractures R' (direction moyenne du pendage N229°E) qui s'arrêtent sur le cisaillement principal Y et sur le décrochement R	
	2 fractures T (direction moyenne du pendage N259°E) qui s'arrêtent sur le cisaillement principal Y et sur les conjuguées en décrochement R et R'	
Granite à deux micas	1 fracture R (direction moyenne du pendage N289°E) qui s'arrête sur le cisaillement principal Y	
	4 fractures T (direction moyenne du pendage N259°E) qui s'arrête sur le cisaillement principal Y et sur le décrochement R	
Contraintes in situ		
L'état des contraintes évalué pour le site de Soultz aux profondeurs concernées (Cornet et al., 2007) est: $\sigma_h = (0,54 \pm 0,02) * \sigma_v$; $\sigma_H = (0,95 \pm 0,05) * \sigma_v$; $\sigma_v = \sigma_v0 + 0,0255 * (z - 1377)$ avec $\sigma_v0 = 1377 * 0,024$ 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°.		

Tableau 2. Synthèse des comportements mécaniques et hydrauliques pris en compte.

Comportement mécanique élastique isotrope des faciès							
	Module de Young E [GPa]	Coefficient de Poisson ν					
Granite standard	52,2	0,25					
Granite à deux micas	47	0,295					
Comportement mécanique des joints							
Loi de comportement de type élastoplastique associée à un critère de Mohr-Coulomb :							
<ul style="list-style-type: none"> $\begin{cases} \tau_s = k_s u_s & u_s \leq \tau_{\max} / k_s \\ \tau_s = \tau_{\max} & u_s > \tau_{\max} / k_s \end{cases}$ où τ_{\max} [Pa] et k_s [Pa.m-1] sont la contrainte et la raideur tangentielle. $\tau_{\max} = c + \sigma_n \tan \phi$ où c [Pa] est la cohésion et ϕ [°] l'angle de frottement $u_n = u_n^{el} + u_n^{dil} = (\sigma_n + \Delta P) / k_n + u_s \tan \psi$ 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. Un déplacement limite $u_{s,c}$ est pris en compte au-delà duquel la dilatance est constante. 							
Comportement hydraulique et hydromécanique des joints							
L'écoulement du fluide au sein des fractures est supposé être laminaire monophasique et obéir à la loi cubique :							
$Q_f = - \frac{\rho g}{12\mu} a^3 \frac{\Delta h}{L}$ où Q_f le débit dans la fracture [m ³ /s], a l'ouverture hydraulique équivalente, $\Delta h/L$ le gradient de charge hydraulique pour une longueur L d'écoulement, ρ [kg/m ³] et μ [Pa.s] respectivement la densité et la viscosité dynamique du fluide, et g [m/s ²] la gravité.							
L'ouverture hydraulique évolue en fonction du déplacement normal de la fracture : $a = a_0 + u_n$ avec a_0 [m] l'ouverture hydraulique initiale. Afin de borner l'augmentation de l'ouverture hydraulique, une valeur maximale, a_{max} , de cette dernière doit être fixée							
Paramètres pris en compte pour les joints							
k_n [MPa/m]	k_s [MPa/m]	c [MPa]	ϕ [°]	ψ [°]	u_s^c [mm]	a_0 [mm]	a_{max} [mm]
80000	80000	0	45	1	10	2,5 10 ⁻³	165 10 ⁻³

3.3. Identification des configurations optimales

A partir du modèle numérique une série de calculs est réalisée en faisant varier la trajectoire de puits ; pour cette étude, quatre trajectoires de puits ont été testées : un puits vertical, un puits incliné à 30° (par rapport à l'horizontale) dans la direction est-ouest, un puits incliné à 30° (par rapport à l'horizontale) dans la direction nord-sud et un puits combinant trajectoire verticale et inclinée à 30° est-ouest. Les résultats sont ensuite analysés afin de déterminer pour quelle trajectoire de puits la stimulation hydraulique est la plus efficace. A ce stade, il faut définir un critère pour juger de cette efficacité et dans le cadre de l'étude présentée, il a été décidé de regarder les ouvertures résiduelles irréversibles créées par la stimulation dans le réservoir autour du puits. Pour cela une procédure de post-traitement des résultats permet de cartographier le halo 3D d'augmentation de l'ouverture hydraulique par rapport à l'ouverture hydraulique initiale. Pour cette étude un facteur trente d'augmentation des ouvertures hydrauliques a été choisi (arbitrairement) afin de mieux visualiser le halo3D et différencier les résultats des différentes configurations. De plus du fait de la densité de fracturation du modèle il est plus aisé de représenter ce halo 3D en le projetant sur les faces Nord, Ouest et Bas du modèle (Figure 3 b) ce qui permet également d'identifier plus aisément les directions préférentielles du halo 3D. Une analyse visuelle qualitative de ces cartographies est réalisée afin de discriminer les quatre configurations ; elle se base sur l'aire des surfaces projetées sur les trois faces. Cette analyse montre que c'est la configuration avec le puits incliné dans la direction est-ouest (Figure 3 a) qui présente les aires de surfaces projetées les plus importantes et donc spatialement la plus grande répartition d'augmentation d'ouverture hydraulique. Par conséquent, en se basant sur ce critère, c'est cette orientation de puits qui permet la plus grande efficacité à la stimulation hydraulique.



3.4. Pré-étude de la stabilité mécanique des puits

Une fois la configuration optimale identifiée une pré-étude de la stabilité mécanique du puits lors de son creusement est réalisée. L'objectif est d'évaluer les risques de rupture mécanique potentiels lors du creusement du puits du fait de sa trajectoire et des contraintes *in situ* ainsi que du faciès de roche rencontré. Pour cela un modèle numérique basé sur une approche particulière avec le code PFC2D© (Itasca 2008b) est mis en œuvre. Avec cette approche, la roche est modélisée par un assemblage de disques (modèle 2D). Différentes familles de disques sont prises en compte afin de représenter les différentes phases minérales constituant la roche réelle. Le comportement mécanique de cette roche « numérique » est régi par les propriétés mécaniques des disques eux même ainsi que par les lois de contact entre les disques. La description de la création des modèles de roche et le modèle numérique mis en œuvre pour simuler le comportement de la roche autour d'un puits sont détaillés dans Peter *et al.* (2015).

En repartant du modèle numérique 3D pour la stimulation hydraulique (§ 3.2) dans son état initial (avant stimulation hydraulique) un post traitement est réalisé en suivant la trajectoire du puits de la configuration optimale (§ 3.3) pour identifier dans les blocs matriciels le tenseur de contrainte 2D (dans un plan perpendiculaire au puits) critique ainsi que dans quel faciès il est rencontré. Pour cette étude le tenseur 2D critique a été identifié comme étant celui induisant la contrainte déviatorique maximale (calculée via l'invariant du tenseur de contraintes $J2 = 1/2 \underline{s} : \underline{s}$ et $\underline{s} = \underline{\sigma} - Tr(\underline{\sigma})/2 \underline{\delta}$). Il est rencontré dans le granite à deux micas. Les valeurs de composantes du tenseur critique sont : $\sigma_{xx} = -106$ MPa, $\sigma_{yy} = -113$ MPa et $\tau_{xy} = -2$ MPa. Le calcul de stabilité mécanique du puits à la foration est donc réalisé en prenant en compte un modèle de roche numérique du granite à deux micas et en appliquant le tenseur 2D identifié. La modélisation du déconfinement total associé à la foration dans le granite à deux micas a engendré des ruptures sur le pourtour du puits (Figure 6a). Il en résulte localement une légère augmentation du diamètre du puits, d'au plus un centimètre (Figure 6 b). Ces résultats de cette pré-étude de la stabilité mécanique du puits lors de sa foration dans la configuration optimale vis-à-vis de la stimulation hydraulique identifiée, n'indiquent pas de risque mécanique avéré.

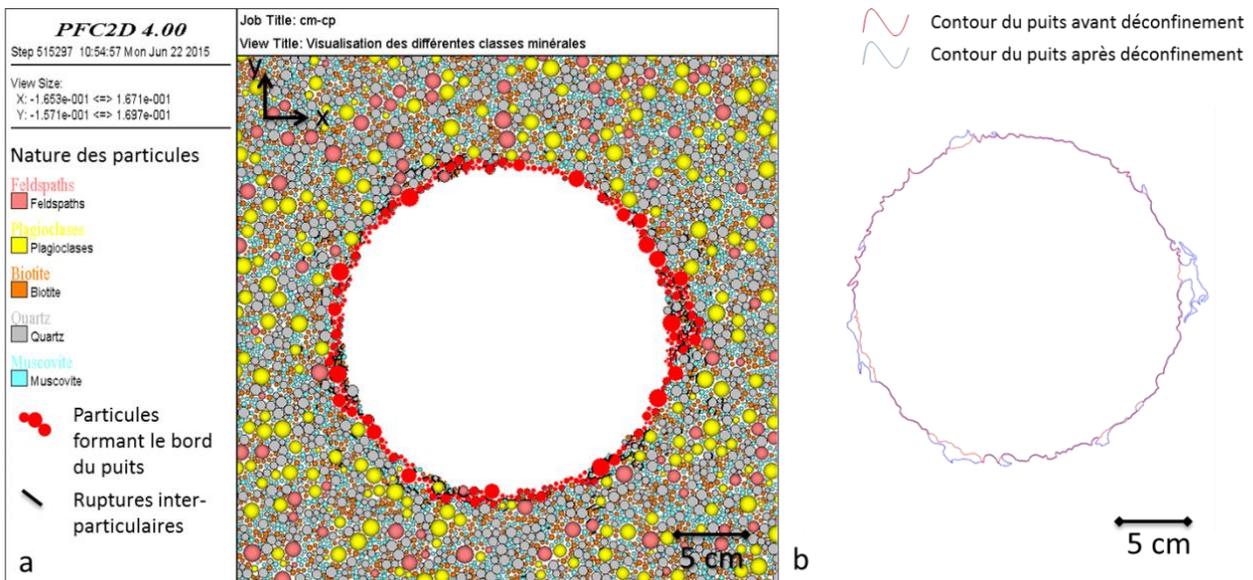


Figure 4 a. Ruptures générées par la foration du puits- b. Evolution du contour du puits suite au déconfinement.

4. Conclusions

La méthodologie présentée dans ce travail associant modèles numériques et conceptualisation des réservoirs géothermiques faillés/fracturés permet d'aider à ébaucher une stratégie opérationnelle coordonnant architecture de puits (orientation, position...) et stimulation hydraulique dans différents contextes géologiques, tout en s'assurant d'un minimum de risque mécanique (stabilité des forages) au niveau de la foration des puits. Elle permet d'envisager une optimisation globale de développement de sites EGS : optimisation technique mais aussi économique en augmentant les chances de succès si déjà le premier puits est optimisé. Au-delà de ce premier puits, l'approche peut être envisagée pour étendre l'optimisation à la réalisation des puits postérieurs et augmenter les chances de mises en connexion et de création de boucles hydrauliques efficaces.

5. Références bibliographiques

- Blaisonneau A., Guillon T., Gentier S., Rachez X., 2015, 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 congress, May 2015, Montreal, Canada.*
- Cornet, F.H., Bérard, Th., Bourouis, S., 2007. How close to failure is a granite rock at a 5km depth?, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 44, pp 47-66, July 2007.
- Dezayes C., Lerouge C., Sanjuan B. Gentier S. avec la collaboration de Guillon T., Peter M., Brach M., Bailly L. Fléhoc C., Innocent C., Wille G, Ramboz C., Gurenko A., 2014, Relations tectonique et anomalies thermiques : le rôle des circulations fluides dans le Fossé Rhénan. Projet TECITUR. BRGM/RP-63928-FR.
- ITASCA Consulting Group, Inc., 2008a: 3DEC, Version 4.0, 3 Dimensional Distinct Element Code. User's Manual. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN.
- ITASCA Consulting Group, Inc., 2008b, PFC2D – Particle Flow Code in 2 Dimensions, Ver. 4.0, Theory and Background Manual. Minneapolis: Itasca.
- Katz Y., Weinberger R., Aydin A., 2004, Geometry and kinematic evolution of Riedel shear structures, Capitol Reef National Park, Utah. *Journal of structural Geology* 26, pp. 491-501.
- Peter-Borie M., Blaisonneau A., Gentier S., Guillon T., Rachez X., 2015, Study of Thermo-Mechanical Damage around Deep Geothermal Wells: from the Micro-Processes to Macroscopic Effects in the Near Well, *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015*, 10p.
- Riedel, W. 1929. Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und paleontologie B*, 354 -368.