

MODELISATION DE LA MICROSISMICITE INDUITE LORS DES PROCESSUS DE SOFT STIMULATION EN GEOTHERMIE EGS

Théophile Guillon, Arnold Blaisonneau, Xavier Rachez, Sylvie Gentier

▶ **To cite this version:**

Théophile Guillon, Arnold Blaisonneau, Xavier Rachez, Sylvie Gentier. MODELISATION DE LA MICROSISMICITE INDUITE LORS DES PROCESSUS DE SOFT STIMULATION EN GEOTHERMIE EGS. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Jul 2016, Nancy, France. hal-01328130

HAL Id: hal-01328130
https://brgm.hal.science/hal-01328130

Submitted on 7 Jun 2016

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

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

MODÉLISATION DE LA MICROSISMICITÉ INDUITE LORS DES PROCESSUS DE SOFT STIMULATION EN GÉOTHERMIE EGS

MODELING THE MICROSEISMIC EVENTS INDUCED BY SOFT STIMULATION OF ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEMS

Théophile GUILLON[1], Arnold BLAISONNEAU[1], Xavier RACHEZ[1], Sylvie GENTIER[2]
[1] *Division Géothermie, BRGM, Orléans, France*
[2] *Direction de la Stratégie, de la Recherche et de l'Evaluation, BRGM, Orléans, France*

RÉSUMÉ – Les travaux présentés dans ce papier reviennent sur la réponse d'un système géothermique soumis à des opérations de *soft stimulation*. Le modèle couplé hydromécanique utilisé intègre l'évaluation de la microsismicité induite. Les résultats montrent le rôle complémentaire des zones de faille présentes dans le système, ainsi que l'impact de leur loi de comportement sur l'estimation de l'énergie sismique.

ABSTRACT – This paper focuses on the coupled response of a geothermal system subjected to soft stimulation operations. The study relies on a hydromechanical model and includes assessing the microseismicity induced by the stimulation. The results highlight the complementary role of the fault zones preexisting in the geothermal system, as well as the impact of their constitutive law on the microseismic events magnitudes.

1. Introduction

Parmi les techniques d'amélioration de l'injectivité des puits dans les EGS (*Enhanced Geothermal Systems*), la *soft stimulation* consiste à appliquer une surpression dans le puits afin de réactiver les zones de faille préexistantes par cisaillement. Le cisaillement subit par les zones de faille peut être à l'origine d'évènements microsismiques dont le suivi peut renseigner sur l'évolution du réservoir géothermique sous les sollicitations thermohydromécaniques et ainsi améliorer sa mise en place et son exploitation (Brown et Duchane, 1999). Toutefois, la microsismicité induite peut devenir problématique lorsqu'elle dépasse des seuils d'acceptabilité : le projet d'EGS à Bâle a été fermé définitivement suite à un séisme de magnitude 3,4 provoqué en 2006 par des opérations de développement (Baisch *et al.*, 2009). La microsismicité induite doit être anticipée et intégrée dans les modèles numériques servant à analyser les conséquences de la *soft stimulation*. De cette façon, les outils numériques peuvent être utilisés pour proposer des scénarios de stimulation garantissant le respect des seuils d'acceptabilité. Dans ce papier, nous proposons de commencer par détailler le modèle hydromécanique (HM) servant à étudier la *soft stimulation* et d'illustrer ses résultats sur un cas d'étude pris à Soultz-sous-Forêts. Ensuite, nous revenons sur la prise en compte de la microsismicité induite et sur les résultats complémentaires apportés au cas d'étude.

2. Modélisation de la *soft stimulation*

2.1. Modèle physique

Le modèle proposé repose sur une conceptualisation propre aux réservoirs géothermiques faillés tel que celui de Soultz-sous-forêts, où la perméabilité de la roche

encaissante est très inférieure à la transmissivité des zones de faille (notées ZdF par la suite). Les phénomènes hydromécaniques sont supposés se produire uniquement au niveau des ZdF, tandis que la masse rocheuse, imperméable en comparaison, n'exprime qu'un comportement mécanique. Toutefois, les interactions HM se produisant dans les ZdF exercent un effort sur la matrice rocheuse et peuvent la déformer. Une description détaillée du modèle physique peut être trouvée dans Blaisonneau et *al.* (2015), et seules ses caractéristiques principales sont rappelées ici.

L'équilibre mécanique global est écrit en tenant compte du comportement élastique de la matrice rocheuse, du comportement élasto-plastique des ZdF, de leur dilatance lors de leur phase plastique, et de l'écoulement du fluide dans les ZdF. Du fait du mécanisme physique mis en jeu lors des *soft stimulations*, c'est à dire réactiver par cisaillement les ZdF préexistantes, le choix de la loi de comportement en cisaillement de ces dernières dans le modèle est prépondérant. L'influence de cette loi de comportement en cisaillement est abordée dans Blaisonneau et *al.* (2015) : les résultats soulignent son fort impact sur la répartition des ouvertures hydrauliques irréversibles dans le réseau et montrent notamment son influence sur l'étendue de la surface en cisaillement de chacune des ZdF et sur la répartition des débits dans les différentes ZdF. La loi de comportement utilisée dans les travaux présentés ici est une loi élastoplastique associée à un critère de Mohr Coulomb (MC). Le comportement normal des ZdF intègre une composante irréversible en considérant un effet de dilatance induite lors du glissement :

$$u_n^{dil} = \begin{cases} 0 & u_s < u_s^p \\ u_s \tan\psi & u_s^p \le u_s < u_s^c \\ u_s^c \tan\psi & u_s^c \le u_s \end{cases} \quad (1)$$

où u_n^{dil} *[m]* est la part en dilatance du déplacement normal, ψ *[°]* l'angle de dilatance, et u_s *[m]* le déplacement de cisaillement. Les déplacements au seuil de plasticité u_s^p *[m]* et critique u_s^c *[m]* bornent la dilatance.

Les interactions HM se produisent dans les ZdF, où le débit d'écoulement dépend directement du déplacement normal :

$$q_l = f\left((a_0 + u_n)^3\right) \quad (2)$$

où q_l *[L.s^{-1}]* est le débit d'écoulement dans la ZdF, a_0 *[m]* l'ouverture initiale de la ZdF, et u_n *[m]* son déplacement normal. L'équation (2) souligne l'impact de la mécanique sur l'hydraulique. Réciproquement, l'écoulement influe sur l'état de contrainte effective dans les ZdF en y modifiant la répartition de la pression.

La stimulation est modélisée par la méthode des éléments distincts (3DEC^{TM}) car elle permet de prendre explicitement les ZdF en compte sous la forme de joints 2D. La position des joints dans le modèle doit être donnée en accord avec les mesures *in situ* du cas étudié. Le cas d'étude présenté dans ce papier est l'*open-hole* du puits GPK4 de Soultz-sous-Forêts pour lequel la position des ZdF est issue de l'interprétation de résultats d'imagerie de puits (UBI). La géométrie est présentée en Figure 1, où l'*open-hole* du puits est un segment vertical au centre du modèle.

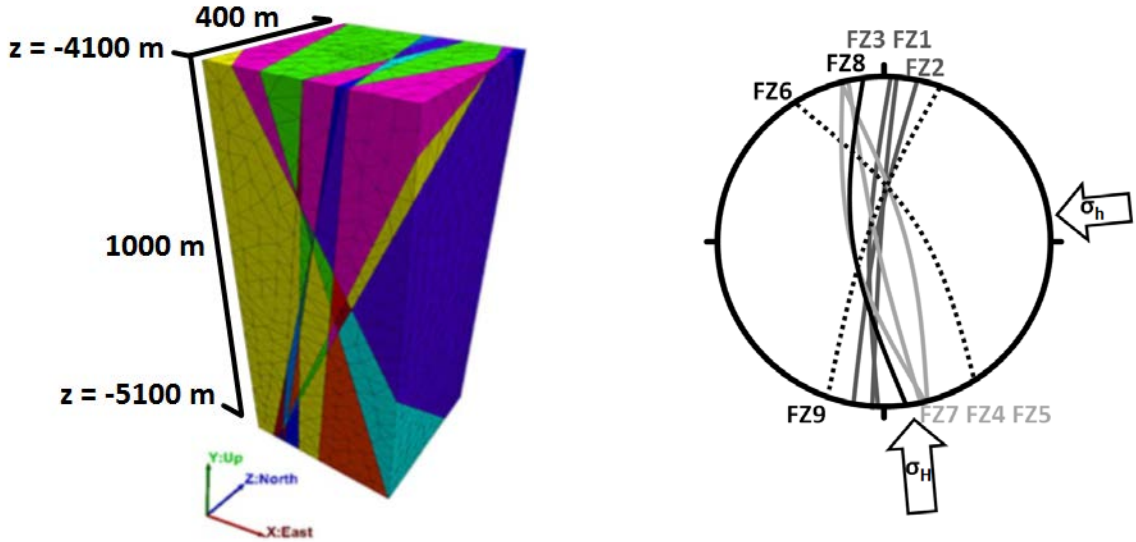


Figure 1. Géométrie du cas d'étude. La matrice rocheuse (blocs) est recoupée par les neuf zones de failles (joints) dont l'orientation par rapport aux contraintes principales horizontales est donnée à droite.

Les conditions aux limites doivent rendre compte de l'état de contrainte naturelle s'exerçant sur la masse rocheuse : les faces ouest, nord et du bas ont leurs déplacements normaux bloqués, tandis que la contrainte naturelle est appliquée sur les faces est, sud et du dessus. Concernant le cas de GPK4, l'état de contrainte appliqué au modèle est issu de relevés dans le puits (Cornet *et al.*, 2007) et l'orientation des contraintes principales horizontales est donnée à droite de la Figure 1. Pour ce qui est des conditions aux limites hydrauliques, une pression hydrostatique est maintenue sur les parois du modèle tout au long de la simulation.

L'état initial est donné par l'état d'équilibre lorsque le modèle est soumis aux conditions aux limites. Ensuite, la *soft stimulation* est simulée en augmentant par paliers successifs la pression hydraulique dans les nœuds d'injection, c'est à dire, les nœuds situés aux intersections de l'*open-hole* et des ZdF.

2.2. Augmentation de l'injectivité du puits

La simulation de la *soft stimulation* est composée de trois phases : une phase de stimulation où la surpression hydraulique dans le puits ΔP_I est augmentée progressivement, une phase de *shut-in* où le débit est coupé dans le puits, et une phase de post-stimulation où les mêmes paliers de surpression que pendant la stimulation sont imposés dans le puits. Le jeu de paramètres est obtenu en calant la courbe de stimulation retournée par le modèle sur les deux points de mesures, et de façon à reproduire qualitativement la forme connue des courbes de stimulation *in situ* (Figure 2). Le jeu de paramètres détaillé correspond à celui du Modèle #1 dans Blaisonneau *et al.* (2015).

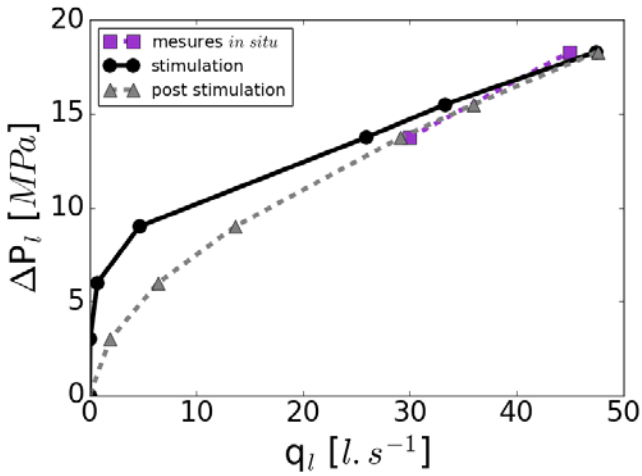


Figure 2. Courbes pression-débit au puits résultant de la modélisation de la *soft stimulation*

Les courbes pression-débit au puits obtenues avec le modèle soulignent l'augmentation de l'injectivité du puits (encore appelée perméabilité apparente du système). Cette augmentation de perméabilité apparente est le résultat direct de la *soft stimulation* et du cisaillement des ZdF qu'elle provoque : sous l'effet du cisaillement et de la dilatance irréversible associée, une ouverture hydraulique supérieure à l'ouverture initiale subsiste dans les ZdF au *shut-in*, ce qui améliore la perméabilité apparente du système lors de la réinjection.

2.3. Rôle du réseau de failles

En faisant une analyse au cas par cas, on constate que l'augmentation de transmissivité des ZdF est fortement liée à leur orientation vis-à-vis de la contrainte horizontale majeure : dans notre cas d'étude, la FZ8 est particulièrement sollicitée, alors que FZ4 et FZ6 le sont beaucoup moins (Figure 3).

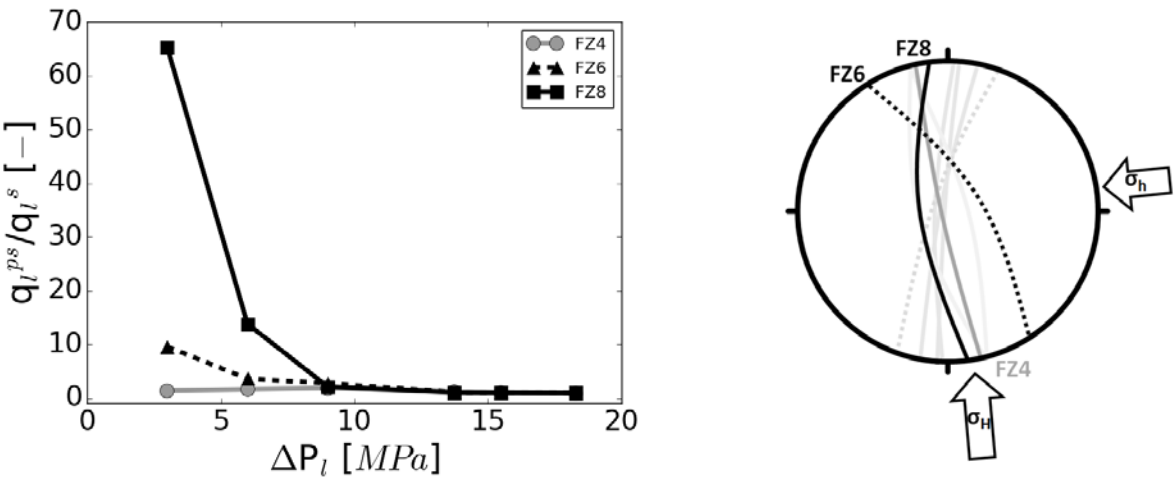


Figure 3. Débits d'entrée dans les zones de faille : gain de débit à la post-stimulation q_l^{ps} par rapport à celui à la stimulation q_l^s

Les ZdF moins affectées par la stimulation peuvent sembler moins intéressantes car elles contribuent assez peu à l'augmentation de la perméabilité apparente du système.

Toutefois, à l'échelle d'un réseau de failles, ces ZdF ont l'intérêt d'améliorer la connexion du système, et de mieux distribuer la surpression sans devoir mobiliser trop de cisaillement. Dans notre cas d'étude, la FZ6 remplit particulièrement bien ce rôle du fait de son faible pendage qui lui permet de traverser le réseau de part en part. FZ6 a par ailleurs un comportement singulier, puisqu'elle présente un gain de débit acceptable alors même qu'elle ne subit aucun cisaillement pendant la phase de stimulation. Après analyse, il s'avère que les ouvertures irréversibles de cette ZdF ne sont pas provoquées par son cisaillement, mais par les rotations des blocs la délimitant sous l'influence du cisaillement des autres ZdF (stimulation indirecte, voir Gentier *et al.*, 2011).

3. Evaluation de la microsismicité induite lors des *soft stimulations*

3.1. Estimation de la microsismicité

Lors du cisaillement des ZdF, une partie de l'énergie mécanique emmagasinée par accumulation de contrainte est libérée sous la forme d'énergie sismique. Aki (1966) estime que l'énergie sismique générée par une zone en cisaillement de superficie A_s $[m^2]$ est donnée par :

$$M_{sis} = \iint_{As} G u_s^{\cos} dA \tag{3}$$

où M_{sis} $[J]$ est l'énergie sismique (aussi appelée moment sismique), G $[Pa]$ le module de cisaillement de la roche encaissante, et u_s^{cos} $[m]$ le déplacement de cisaillement cosismique.

u_s^{cos} dépend de la loi de comportement considérée. Dans le cas de la loi de MC, nous faisons l'hypothèse que les microséismes sont générés par le frottement des aspérités des deux épontes lorsqu'elles ne sont plus alignées. Ce phénomène apparaît dès que la dilatance se produit et se poursuit au-delà du déplacement de cisaillement critique :

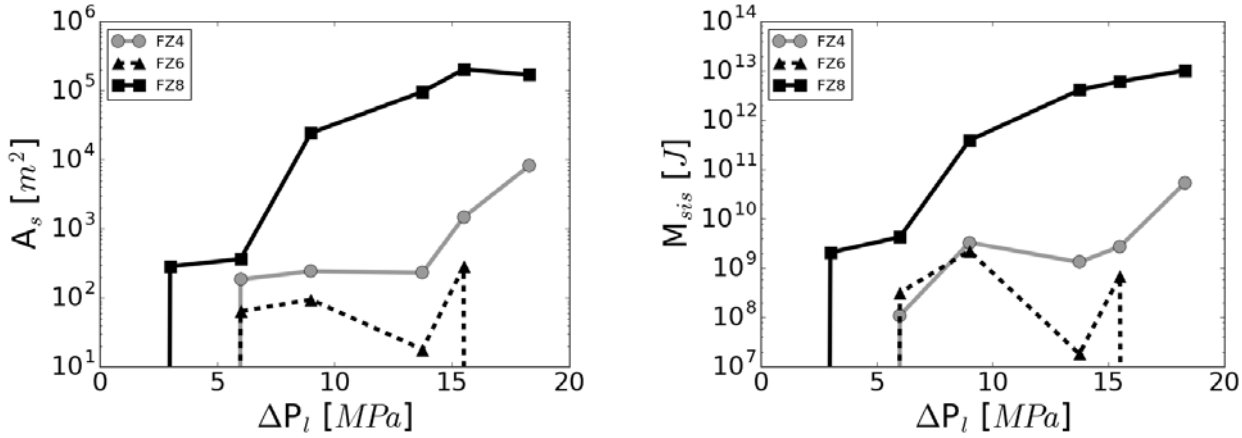
$$u_s^{\cos} = \begin{cases} 0 & u_s < u_s^p \\ u_s - u_s^p & u_s^p \le u_s \end{cases} \tag{4}$$

Une fois le moment sismique évalué, la magnitude de moment *M* est donnée par (Hanks et Kanamori, 1979) :

$$M = 2/3 \log\left(M_{sis}\right) - 6 \tag{5}$$

3.2. Microsismicité induite au sein du réseau 3D

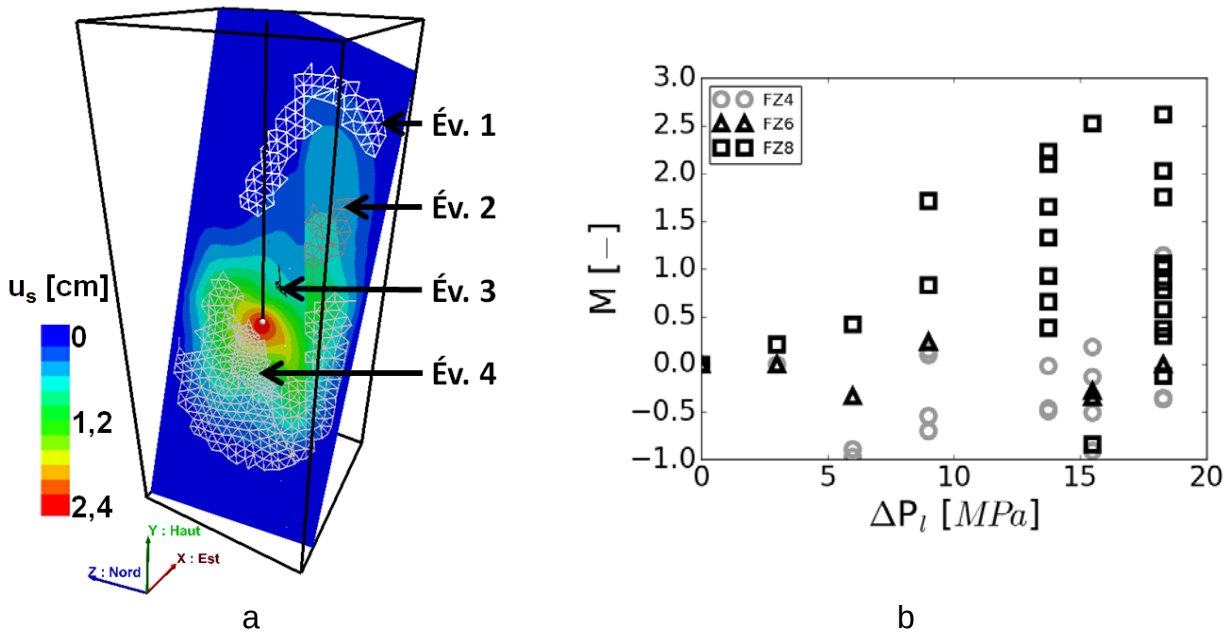
L'énergie sismique libérée le long d'une ZdF est directement proportionnelle à la surface en cisaillement (équation (3)). En conséquence, les ZdF fortement affectées par le cisaillement, telle que la FZ8, vont relâcher beaucoup plus d'énergie que les ZdF moins cisaillées, par exemple FZ4 et FZ6 (Figure 4).



a b

Figure 4. Proportionnalité entre a. la surface en cisaillement et b. le moment sismique. FZ8 cisaillant beaucoup, elle génère une microsismicité non négligeable.

L'énergie représentée en Figure 4b résulte pour chaque ZdF de la somme de plusieurs évènements microsismiques indépendants. La magnitude doit être évaluée sur les évènements indépendants, et pas sur l'énergie totale. Dans notre modèle, le critère d'individualisation des évènements est basé sur la relation de voisinage des nœuds du maillage : si deux nœuds cosismiques appartiennent à une même maille, alors ils participent au même évènement microsismique (Figure 5a).



a b

Figure 5. Magnitude des évènements microsismiques : a. illustration de l'individualisation des évènements sur FZ8 lors du dernier palier de surpression, et b. moments sismiques des évènements individualisés sur les FZ4, FZ6 et FZ8

La Figure 5b confirme que la FZ8 est source d'activité microsismique (plus du double d'évènements que la FZ4 ou la FZ6). Les résultats confortent aussi la particularité de la FZ6, qui n'exprime que peu de microsismicité alors qu'elle améliore l'efficacité de la stimulation à l'échelle du réseau. Ce type de structure est particulièrement intéressant en géothermie EGS où la microsismicité induite doit rester sous des seuils d'acceptabilité.

3.3. Influence de la loi de comportement mécanique des zones de faille

Le modèle utilisé dans cette étude surestime l'énergie sismique. En effet, le déplacement cosismique associé à la loi de MC n'a pas de limite supérieure et peut virtuellement faire tendre les estimations de moment sismique vers l'infini. Dans la réalité, la sismicité est associée à une chute de contrainte dont la nature finie borne naturellement l'énergie sismique libérée. Le logiciel 3DEC™ propose la loi de type pic-résiduelle CYJM (*Continuously Yielding Joint Model*, voir Itasca 2013) avec laquelle des déplacements au pic et résiduel peuvent être identifiés (respectivement u_s^{pic} et $u_s^{rés}$, voir Figure 6b). Le déplacement cosismique sera au maximum de $u_s^{rés}$ -u_s^{pic} :

$$u_s^{\cos} = \begin{cases} 0 & u_s < u_s^{pic} \\ u_s - u_s^{pic} & u_s^{pic} \le u_s < u_s^{rés} \\ 0 & u_s^{rés} \le u_s \end{cases} \qquad (6)$$



Figure 6. Deux lois de comportement en cisaillement : a. Mohr-Coulomb et b. pic-résiduelle (CYJM de 3DEC™)

En reprenant les paramètres du Modèle #2 dans Blaisonneau *et al.* (2015), la réponse pression-débit au puits est comparable à celle obtenue en Figure 2. Toutefois, le moment sismique estimé pour la FZ8 est bien inférieur à celui obtenu avec la loi de MC (Figure 7a)

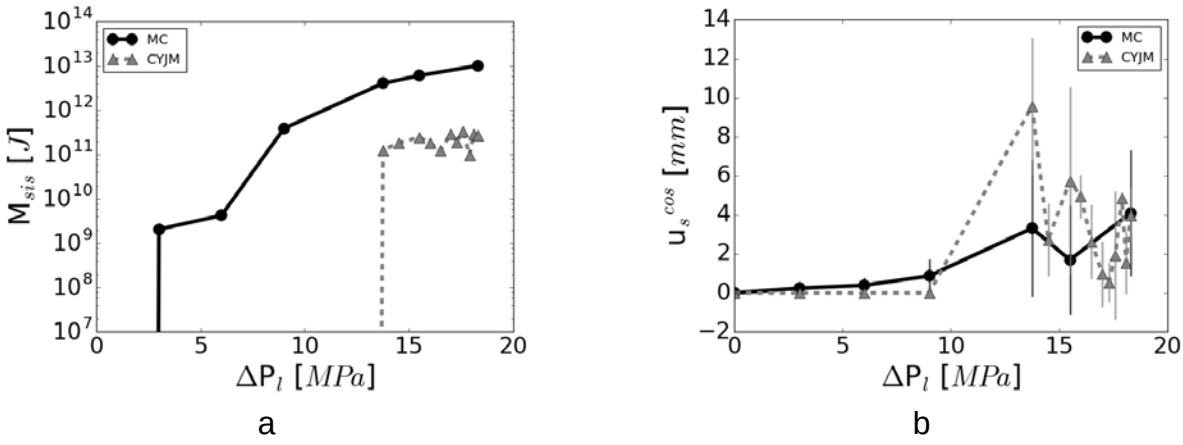


Figure 7. a. Moment sismique et b. déplacement cosismique (moyenne et écart-type) de la FZ8 selon la loi de comportement utilisée

Même s'il est borné avec la loi CYJM, le u_s^{cos} moyen est plus important que celui de la loi MC (Figure 7b). Toutefois, avec la loi CYJM les nœuds mécaniques peuvent sortir de l'état cosismique pendant le cisaillement, ce qui n'est pas le cas avec la loi de MC où tout nœud ayant dépassé le seuil de plasticité continuera à générer de la microsismicité tant qu'il sera en cisaillement. Il en résulte des évènements à peu près deux fois moins

nombreux avec la loi CYJM, et également moins intenses ((magnitude de moment maximum à *M*=1,4 contre 2,6 avec MC).

4. Conclusions

Les calculs présentés dans ce document intègrent l'évaluation de la microsismicité induite dans les simulations des opérations de *soft stimulation*. Les résultats confirment le caractère sismogène des zones de failles motrices dans la stimulation (c'est-à-dire, les failles qui cisaillent beaucoup), et soulignent l'intérêt de la stimulation indirecte dans la réduction de la microsismicité induite. La loi de comportement est à choisir avec attention car au-delà de son impact sur la réponse hydromécanique des zones de faille, elle conditionne la définition du déplacement cosismique. Les résultats obtenus avec une loi de type pic-résiduelle montrent que les évènements sont moins nombreux et de magnitude plus faible. Toutefois, la loi de comportement doit encore être enrichie pour pouvoir être comparée et calée aux données *in situ* : effets 3D des zones de faille (simplifiées comme 2D ici), reproduction des évènements après *shut-in*, rupture dynamique pour la redistribution des contraintes après rupture…

5. Remerciements

Les auteurs remercient le projet GEISER (*FP7 Grant Agreement no. 241321-2*), qui a permis le développement des outils de calcul des moments sismiques.

6. Références bibliographiques

Aki K. (1966). Generation and propagation of G waves from the Niigata Earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, vol. 44, pp. 73-88.*

Baisch S., Carbon D., Dannwolf U., Delacou B., Devaux M., Dunand F., Jung R., Koller M., Martin C., Sartori M., Secanell R., Vörös R. (2009). Deep Heat Mining Basel - Seismic Risk Analysis. *Rapport d'expertise, 21 pages.*

Blaisonneau A., Guillon T., Gentier S., Rachez X. (2015). Éléments 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. *Proceedings, 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics, 15 pages.*

Brown D.W., Duchane D.V. (1999). Scientific progress on the Fenton Hill HDR project since 1983. *Geothermics, vol. 28, pp. 591-601.*

Cornet F.H., Bérard Th., Bourouis S. (2007). How close to failure is a granite rock mass at a 5km depth? *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 44, pp. 47-66.*

Gentier S., Rachez X., Peter-Borie M., Blaisonneau A. (2011). Hydraulic stimulation of geothermal wells: Modeling of the hydro-mechanical behavior of a stimulated fractured rock mass. *Proceedings, 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, pp. 524–525.*

Hanks T.C., Kanamori H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research, vol. 85, pp. 2348-2350.*

Itasca Consulting Group, Inc. (2013). 3DEC – Three-Dimensional Distinct Element Code, Ver. 5.0. *Minneapolis: Itasca.*