

Comité Français de Mécanique des Roches Society of Petroleum Engineers, France



CFMR

Le secrétaire général

Siavash Ghabezloo

Email : secretaire-general@cfmr-roches.org



France Section

Séance technique : Sismicité induite

Organisée par Jean Sulem (ENPC) et Nicolas Guy (IFPEN)

Jeudi 14 mars 2019, à 14h00

CNAM, 292, rue Saint-Martin, 75003 Paris

Amphi Robert Faure

14 : 00 Accueil des participants et informations CFMR

Jean Sulem, Président du CFMR.

14 : 10 Introduction à la séance

Jean Sulem (Ecole des Ponts ParisTech) et Nicolas Guy (IFPEN).

14 : 15 Activités humaines et déclenchement des séismes

Jean Sulem et Ioannis Stefanou, Laboratoire Navier-CERMES, Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR, CNRS, Marne-la-Vallée.

14 : 45 Sismicité anthropique : l'état des connaissances sur les aléas et les risques

Isabelle Contrucci et Emmanuelle Klein, Ineris, Nancy.

15 : 15 Stimulation hydraulique et sismicité induite : Application au développement de la géothermie EGS

François H. Cornet, Université de Strasbourg

Pause

16 : 00 Modélisation numérique de la sismicité induite par la stimulation hydraulique des réservoirs géothermiques

Frédéric L. Pellet, Dac T. Ngo et Dominique Bruel, MINES ParisTech, PSL Research University, Centre de Géosciences, Fontainebleau.

16 : 30 Écoulement de fluide pressurisé dans le domaine de stabilité mécanique de zones faillées argileuses ?

Frédéric V. Donzé, Isterre, Université Grenoble Alpes.

17 : 00 Discussion

17 : 30 Fin de la séance

Activités humaines et déclenchement des séismes

Jean Sulem et Ioannis Stefanou

Laboratoire Navier-CERMES, Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR, CNRS, Université Paris-Est,
Marne-la-Vallée, France
jean.sulem@enpc.fr

En introduction à la séance, nous rappellerons les mécanismes de déclenchement des séismes et les bases théoriques qui les décrivent. Nous ferons un tour d'horizon des activités humaines susceptibles d'être à l'origine d'une activité sismique à cause de l'altération de l'état des contraintes et de pression fluide qu'elles induisent. Considérant l'omniprésence de failles dans la croûte terrestre et le fait que la plupart d'entre elles sont proches de leur état limite à la rupture, une modification même faible de l'état de contraintes peut engendrer un évènement sismique majeur. Il est cependant souvent difficile d'affirmer avec certitude si un séisme est d'origine naturelle ou induit par une activité industrielle. Les critères d'appréciation sont l'histoire sismique de la zone concernée, la corrélation temporelle entre l'activité et la sismicité, la proximité spatiale et la faible profondeur de l'épicentre du séisme avec la zone concernée par l'activité industrielle. Les séismes induits sont souvent inattendus et se produisent le long de failles qui n'ont pas été repérées ou dans des régions considérées comme asismiques, ce qui signifie que la population et les infrastructures n'y sont pas préparées. Un point crucial est l'évaluation du potentiel de nuisance que peut engendrer un séisme et pour cela la magnitude maximale est le paramètre critique et de nombreuses études tentent de corréler ce paramètre à l'activité industrielle concernée (volume de fluide injecté ou pompé, variations de pression fluide, pression d'injection...). Pour cela l'auscultation sismique est essentielle et doit accompagner tout projet industriel présentant un risque sismique. La constitution d'une base de données bien documentée peut être un outil particulièrement utile dans l'évaluation et la prévention des risques sismiques. C'est l'objectif recherché par la base *Hiquake* (<http://www.inducedearthquakes.org>) qui répertorie près d'un millier de cas. Quelques projets de recherche comme *CoQuake* développé au laboratoire Navier (P.I. Ioannis Stefanou) ont pour objectifs de contrôler l'activité sismique. Ce projet a vocation à développer des nouveaux outils théoriques, numériques et expérimentaux, destinés à répondre à des questions scientifiques ouvertes et fondamentales relatives à la réactivation des failles sismiques.

Sismicité anthropique : l'état des connaissances sur les aléas et les risques

Isabelle Contrucci et Emmanuelle Klein

Ineris, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Nancy
isabelle.contrucci@ineris.fr

Depuis la révolution industrielle, la demande mondiale en énergie fossile comme en matières premières a engendré une augmentation considérable de l'exploitation des ressources du sous-sol. Ainsi, la multiplication des sites, l'ampleur croissante des projets, ainsi que les utilisations nouvelles du sous-sol augmentent d'autant la probabilité de générer une sismicité dite anthropique. Ces nouvelles utilisations sont aussi diverses que l'exploitation non-conventionnelle d'hydrocarbures, le stockage souterrain, l'injection définitive d'eau de rejet, la géothermie profonde, la séquestration géologique du CO₂, auxquelles s'ajoutent les utilisations historiques telles que : l'exploitation minière, l'exploitation conventionnelle d'hydrocarbures, le remplissage de retenues de barrages. Or la multiplicité, la diversité et l'envergure croissante des projets d'exploitation, ainsi que les utilisations nouvelles du sous-sol, augmentent le risque que ces activités industrielles puissent générer des séismes dits « anthropiques ».

Les opérations industrielles dans le sous-sol génèrent des modifications du champ de contraintes naturelles et/ou du champ de pression hydraulique dans le massif encaissant. Lorsque ces modifications hydromécaniques excèdent les propriétés de résistance des roches encaissantes, elles peuvent être à l'origine de phénomènes de rupture engendrant une sismicité anthropique qualifiée de « sismicité induite ». Celle-ci est en général de faible magnitude (< 2) et n'est que rarement ressentie en surface. Mais, sous certaines conditions, ces perturbations peuvent également réactiver des failles naturelles présentes sur le site et déclencher des séismes de plus forte magnitude ; cette sismicité est

qualifiée de « sismicité déclenchée ». Ces deux types de sismicité sont qualifiés d'anthropique et se manifestent en général à des profondeurs plus faibles que les séismes naturels.

La sécurité publique peut être mise en péril, lorsque cette sismicité a lieu dans des régions de sismicité naturelle faible où il n'existe aucune prescription parasismique. L'acceptabilité sociale peut également être remise en cause, et conduire à l'arrêt voire l'abandon de projets industriels y compris dans le cas de séismes ressentis de très faible intensité. Dans certains cas, cette sismicité peut perdurer longtemps après l'arrêt des opérations industrielles, voire se produire à plusieurs kilomètres des opérations, notamment lors d'opérations d'injections / extractions de fluides dans le sous-sol.

Des solutions, basées sur la surveillance microsismique couplée au pilotage du processus industriel, peuvent être envisagées par les exploitants pour maîtriser l'aléa sismicité anthropique. Différentes stratégies sont développées autour des paramètres d'exploitation pour diminuer les pressions de fluide dans le sous-sol, ou optimiser le chargement ou déchargement gravitaire en profondeur et/ou en surface. De même des solutions existent pour réduire la vulnérabilité des enjeux quand la relocalisation du projet n'est pas possible. Concernant la sécurité au travail dans les mines, les opérateurs disposent de différentes approches pour limiter l'exposition des mineurs.

Le risque de sismicité anthropique constitue de nouveaux défis tant en termes de connaissance et d'évaluation de l'aléa qu'en terme de gestion du risque. La synthèse qui est présentée, s'appuie sur une vaste étude bibliographique et l'analyse de cas récents ou emblématiques sur ce sujet. Ce rapport de synthèse peut être téléchargé sur le site de l'Ineris : [en français](#) et [en anglais](#).

Stimulation hydraulique et sismicité induite Application au développement de la géothermie EGS

François H. Cornet
Université de Strasbourg
francois.cornet@unistra.fr

Si la température augmente avec la profondeur dans la plupart des régions du globe, seules quelques domaines d'étendue limitée, présentent à la fois une température et une perméabilité suffisamment élevée pour permettre une exploitation économique de cette chaleur. On appelle EGS (Enhanced Geothermal Systems) les systèmes géothermiques présentant une température d'intérêt économique mais dont la perméabilité naturelle doit être stimulée de façon significative pour transformer le gisement de chaleur en gisement géothermique d'intérêt économique.

L'exposé rappellera tout d'abord les deux techniques de stimulation considérées, à savoir la fracturation hydraulique et la stimulation par dilatance du fait de mouvements de cisaillements à plus ou moins grande échelle. Les projets actuels d'application de la fracturation hydraulique (projet FORGE aux USA) correspondent à une adaptation des techniques développées pour l'exploitation des gaz de schistes à partir de forages horizontaux. Le site de Soultz-sous-forêts dans le fossé rhénan, et seul site au monde exclusivement EGS actuellement en cours d'exploitation, a été développé grâce à la dilatance associée à divers mouvements de cisaillement.

L'exposé montrera comment le site expérimental du Mayet de Montagne (entre 500-800 m de profondeur) a permis d'exploiter les mécanismes au foyer de la sismicité induite générée par ces stimulations pour préciser les variations de pression interstitielle dans le massif. Sera alors discuté le concept de contrainte effective à l'échelle du massif. L'importance de la magnitude de la contrainte principale minimum dans le massif sur le processus de stimulation sera enfin soulignée avec ses conséquences pour l'application des stimulations par fracturation hydraulique.

L'exposé abordera ensuite les deux étapes du développement du réservoir de Soultz (réservoir entre 2800m- 3400m et réservoir entre 4500m et 5000 m) et montrera comment la sismicité induite a permis de mettre en évidence quatre niveaux différents pour caractériser les couplages hydro-mécaniques liés à ces stimulations. Plus particulièrement seront abordés les limites du comportement poro-élastique, le domaine des glissements induits sur des structures préexistantes, et finalement la formation de zones de rupture fraîche en cisaillement, satisfaisant au critère de rupture de Hoek et Brown (1980) exprimé en contrainte effective.

Puis l'exposé abordera la question de l'amplitude maximum à attendre de la sismicité induite, avec l'exemple de Bâle, site pour lequel les essais ont dû être stoppés du fait des magnitudes supérieures à 3 observées. Seront discutés alors les mouvements asismiques observés à Soultz et les propositions que

l'on peut formuler pour s'assurer que les stimulations par cisaillement induits sont conduites en toute sécurité pour les activités de surface.

Modélisation numérique de la sismicité induite par la stimulation hydraulique des réservoirs géothermiques

Frédéric L. Pellet, Dac T. Ngo, Dominique Briel
MINES ParisTech, PSL Research University, Centre de Géosciences, Fontainebleau
frederic.pellet@mines-paristech.fr

L'exploitation de l'énergie géothermique est une des solutions les plus prometteuses pour la production massive de chaleur renouvelable, cela afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Elle peut être considérée comme une énergie de base, presque sans émissions de CO₂. Dans les projets géothermiques de haute énergie, la stimulation hydraulique (SH) est fréquemment utilisée pour développer un réservoir fracturé naturellement. L'idée de base est d'injecter de l'eau avec une pression suffisante dans le massif cible pour créer une nouvelle structure réservoir, perméable à grande échelle, reliant les puits d'injection et de production. Ce faisant, le risque de déclencher un séisme est important comme l'ont montré plusieurs événements récents (Bâle, 2006 ; Corée, 2017).

Dans cet exposé, on présente dans un premier temps des simulations numériques avec couplage hydro-mécanique permettant d'étudier les conditions d'apparition et de propagation de fractures suite à l'injection du fluide. Puis la connexion de ces fractures nouvellement créées avec les défauts préexistants (failles) est simulée et le comportement au cisaillement de ces derniers est modélisé. Enfin, la propagation des ondes résultant de la réactivation des failles préexistantes est modélisée et les accélérations en surface sont calculées.

Les résultats montrent clairement les conditions qui conduisent au déclenchement de séismes. Il est également démontré que dans des conditions de friction spécifiques, l'augmentation de la perméabilité d'une structure composée d'une suite de fractures est possible au moyen d'un test d'injection.

Écoulement de fluide pressurisé dans le domaine de stabilité mécanique de zones faillées argileuses ?

Frédéric V. Donzé
Isterre, Université Grenoble Alpes
frederic.donze@univ-grenoble-alpes.fr

De récents essais d'injection dans des zones de failles argileuses suggèrent une possible réponse mécanique sous-critique pour expliquer pourquoi la perméabilité peut augmenter d'un facteur 10-100 (atteignant la plage du milli-Darcy) alors que l'enregistrement de la déformation indique une réponse plastique négligeable. Ceci a été observé lors d'essais d'injection de fluide réalisés à l'intérieur de la zone de faille riche en argile de Tournemire à environ 250m de profondeur [Guglielmi et al, 2015 ; Guglielmi et al, 2017]. Ces essais d'injection ont été réalisés dans le cadre du projet "Fluides et failles" (financé par TOTAL) qui visait à mieux contraindre la possible relation entre la perméabilité, la pression, les contraintes et les déformations dans des roches argileuses faillées [Henry et al., 2016]. Sur la base des résultats issus de ce projet hautement monitoré, nous avons étudié numériquement les conditions hydromécaniques dans lesquelles le débit et la perméabilité augmentent en fonction de la pression du fluide tandis que la réponse mécanique des zones chargées hydrauliquement présente une réponse réversible à la déformation.

Essais expérimentaux in situ Tournemire

Une série d'expériences utilisant la sonde SIMFIP mise au point par Y. Guglielmi [Guglielmi et al., 2015] a été réalisée dans une zone de faille à très faible perméabilité (moins de 10⁻¹⁹ m²), dans la formation argileuse du Laboratoire de recherche souterrain de Tournemire. L'équipement utilisé pour mettre sous pression le fluide était composé d'une sonde ancrée aux parois du forage et placée entre deux packers, pour enregistrer le déplacement 3D entre deux points ainsi que l'évolution de la pression

et du débit du fluide. Au cours des essais, l'eau a été initialement injectée à basse pression pendant une durée limitée. Par la suite, cette pression a été graduellement augmentée pour être maintenue constante, généralement sur une même durée, tout en surveillant les déformations induites dans le milieu faillé. Après avoir atteint une pression seuil, on a pu observer une forte augmentation du taux d'écoulement à pression constante. Plusieurs séries d'essais ont été effectuées et dans tous les cas, une augmentation substantielle de l'écoulement (plus de 100 mL/min) a été observé uniquement, et de façon reproductible, au-dessus d'un seuil de pression bien identifié, appelé pression d'ouverture de fracture (POF) [Henry et al, 2016].

Modélisation numérique & discussion

Pour reproduire ce mode de propagation du fluide d'un point de vue hydromécanique, un modèle aux éléments discrets a été utilisé. Les simulations prenant en compte un ou plusieurs plans de glissement potentiels homogènes le long des discontinuités, arrivent à reproduire correctement les phases d'ouverture hydraulique observées lors de la montée en pression, mais elles ont été incapables d'expliquer l'absence de réponse plastique en présence de contraintes cisailantes in-situ. Cette absence de réponse irréversible pourrait être la conséquence de la nature hétérogène des discontinuités sollicitées : le mouvement de glissement limité pourrait-être lié à la présence de calcification partielle ou de rugosité le long des discontinuités, ce qui mènerait à un processus de chenalisation du fluide sur des distances pouvant être décimétriques.

Guglielmi, Y., Elsworth, D., Cappa, F., Henry, P., Gout, C., Dick, P., & Durand, J. (2015). In situ observations on the coupling between hydraulic diffusivity and displacements during fault reactivation in shales. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(11), 7729-7748.

Guglielmi, Y., Birkholzer, J., Rutqvist, J., Jeanne, P., & Nussbaum, C. (2017). Can fault leakage occur before or without reactivation? Results from an in situ fault reactivation experiment at Mont Terri. *Energy Procedia*, 114, 3167-3174.

Henry, P., Guglielmi, Y., Morereau, A., Seguy, S., Castilla, R., Nussbaum, C., Dick, P., Durand, J., Jaeggi, D., Donze, F.V., & Tsopela, A. (2016, February). Permeability-Fluid Pressure-Stress Relationship in Fault Zones in Shales. In *AGU Fall Meeting Abstracts*.

CFMR