

OFFRE DE THESE

Etude numérique des mécanismes d'érosion et de dissolution au sein des fractures d'un milieu rocheux : application à la géothermie

Date de publication : 17/03/2025

Lieu : Verneuil-en-Halatte (60) - accessible en transports en commun, à 40 mn au Nord de Paris

Type de contrat : stage

Contact : farid.laouafa@ineris.fr

CONTEXTE ET MOTIVATIONS DE LA THESE

La compréhension du comportement thermo-hydro-mécanique des zones de faille ou des réservoirs naturellement fracturés est essentielle à la fois pour les géosciences fondamentales et appliquées, en particulier pour l'évaluation de la sécurité des stockages et ouvrages souterrains, notamment ceux liés à l'énergie géothermique profonde, etc. La complexité des comportements des fractures, de leurs interactions, de leur évolution, ainsi que le manque de fondamentaux physiques rendent extrêmement difficile l'évaluation, la prédiction et le contrôle de celle-ci notamment lors de perturbations thermiques, hydrauliques et mécaniques du milieu. Cette complexité est inhérente aux caractères multi-échelle et multiphysique du problème mais également aux incertitudes pesant sur de nombreux paramètres physiques et géométriques.

Dans le cas des projets de production géothermiques profondes (bassin Rhénan par exemple), différents types de problèmes se posent à différentes échelles de temps. A court terme, le risque d'activation des failles présentes dans la formation réservoir et de sismicité induite est très contraignant et doit pouvoir être analysé pour ces projets. A plus long terme, l'eau circulant dans le réseau des fractures, chargée en différents minéraux et subissant de forts changements de température sur sa trajectoire entre les puits d'injection et de production, peut avoir des interactions physico-chimiques avec les roches environnantes et modifier les propriétés hydrauliques du réseau. Les phénomènes de dissolution-précipitation peuvent se produire dans ce contexte et avoir, à moyen ou à long termes, des effets importants sur les propriétés hydrauliques du réseau de fractures. Il a été déjà observé que la réactivité chimique des fluides a pu mettre en cause l'injectivité du fluide dans ces contextes. Dans des roches plus tendres (calcaires), des phénomènes d'érosion interne et d'arrachement et de dépôts de particules peuvent également être présents.

Les phénomènes de dissolution d'évaporites ou d'érosion interne et surfacique affectent non seulement les caractéristiques d'écoulement ou d'infiltration et le comportement mécanique du milieu (rocheux dans notre problématique) mais posent également la question de l'évolution spatio-temporelle de ces discontinuités. Dans le cas de la géothermie, la qualité et la performance du processus lui-même peut en être fortement affecté en raison du changement dans la structure du milieu causé par l'érosion. On notera qu'au phénomène d'érosion (incluant transport et éventuellement colmatage) peut s'ajouter un mécanisme de dissolution dépendant de la nature des espèces minérales en présence.

L'érosion comme mécanisme perturbateur du milieu rocheux fracturé (perturbation en termes de propriétés géomécaniques, conductivité hydraulique, etc.) ainsi que les possibles mécanismes de colmatage a fait l'objet d'études diverses tant au niveau expérimental que numérique, permettant de mettre en évidence en particulier les formalismes mathématiques et physiques décrivant l'érosion surfacique (au niveau des discontinuités) et matricielle (au niveau des pores de la roche).

La majorité des études présentées dans la littérature est basée sur différentes approches numériques permettant d'analyser l'influence de certains paramètres, plus particulièrement l'intensité du gradient hydraulique et la granulométrie des particules circulant au sein des fractures du milieu et la morphologie et les caractéristiques de la fracture. Quelques études expérimentales ont été menées qui mettent également en évidence l'influence de paramètres similaires. Etant en nombre plus restreint, elles ont une importance particulière en pouvant permettre une validation plus quantitative des différentes approches numériques et des hypothèses à la base de ces modèles. Les résultats expérimentaux ont mis en évidence plusieurs mécanismes de colmatage et décolmatage fonction de différents paramètres associés à la nature de la fracturation (rugosité, tortuosité, réseau), la nature des particules (taille, gradation, concentration, ...) et l'écoulement du fluide (gradient hydraulique, viscosité du fluide, ...). Les différentes approches de modélisation numérique présentées dans la littérature prennent en compte de façon plus ou moins directe certains de ces paramètres.

OBJECTIF DE LA THESE

La thèse portera sur une composante du comportement THMC (thermo-hydro-mécanique et chimique) d'un milieu multi-fracturé sous chargements hydraulique et thermique représentant l'injection des fluides à température différente de celle du milieu géologique et correspondant au contexte de la production géothermique.

Il s'agira d'approfondir différentes approches de modélisation (continues et/ou discrètes) afin d'exhiber les principaux mécanismes régissant le comportement du massif fracturé à différentes échelles spatiales et temporelles. L'approche se fera premièrement dans un cadre déterministe et éventuellement dans un deuxième temps dans un cadre probabiliste pour pouvoir intégrer les incertitudes sur la géométrie, la densité et la distribution spatiale des failles ainsi que les effets de non-planéité des discontinuités ou de persistance des fractures.

Plusieurs pistes de recherche se dégagent dès à présent et pourront être explorées, basées sur des simulations numériques CFD-DEM (*Computational Fluid Dynamics - Discrete Element Method*) en continuation des travaux de Wang et al¹. Ceux-ci ont concerné l'étude de la migration des particules dans une fracture en étudiant l'influence de différentes caractéristiques de la fracture, et ont permis d'obtenir une formule de calcul de la vitesse des particules à travers la fracture.

Parmi les perspectives de l'étude on peut mettre en avant l'influence de la tortuosité de la fracture, l'influence du frottement relatif particule-paroi, l'érosion des parois de la fracture par attrition et/ou chocs des particules circulant dans le milieu ainsi que les conséquences sur l'écoulement du fluide.

Par ailleurs dans le cas plus spécifique de la géothermie, des phénomènes de dissolution peuvent prendre naissance du fait en particulier du changement de température des fluides circulant dans les fissures, ainsi que des phénomènes de recristallisation se traduisant par des dépôts solides dans les fissures. L'effet du changement de température sur les propriétés du milieu et sur l'érosion sera également pris en compte dans la simulation numérique.

Chronologie de la thèse

1. Analyse bibliographique

2. Formalisation de la problématique pour un milieu contenant une unique fracture : problème mono et bidimensionnel
3. Extension de la démarche à un milieu contenant plusieurs fractures : analyses 2D et 3D
4. Modélisations numériques de problèmes aux limites couplés THMC s'appuyant sur différents codes de calcul par des approches discrètes et continues

COLLABORATION :

Dans les recherches précédentes, nous avons collaboré avec l'équipe du Professeur Yin à PolyU Hong Kong pour compléter l'étude de la migration des particules dans une fracture, en étudiant l'influence de différents paramètres de la fracture sur la migration des particules, et en obtenant l'expression de la vitesse des particules à travers la fracture. Les perspectives du présent sujet de thèse se placent dans la poursuite de cette collaboration entreprise depuis plusieurs années.

Des réunions de travail entre l'Ineris, Centrale Nantes et PolyU seront organisées régulièrement. L'université polytechnique de Hong Kong sera principalement impliquée dans la recherche liée aux techniques de simulation numérique, tandis que Centrale Nantes et Ineris se chargeront de l'analyse des résultats numériques et de la dérivation théorique. L'objectif est de produire un ensemble complet de méthodes de simulation de l'érosion pour le génie géothermique, ainsi qu'un cadre théorique pour évaluer quantitativement le degré d'érosion au cours de l'exploitation géothermique d'un site.

REFERENCES

- T., Wang, Tuo, P., Wang, Pei, Z.Y., Yin, Z. Y., F., Laouafa, Farid, P.Y., Hicher, Pierre Yves. Hydro-mechanical analysis of particle migration in fractures with CFD-DEM. *Engineering Geology*, 2024
- Laouafa, F., Guo, J. & Quintard, M. Underground Rock Dissolution and Geomechanical Issues. *Rock Mech Rock Eng* 54, 3423–3445 (2021).
- Imen Zaier, Joël Billiotte, Arnaud Charmoille, Farid Laouafa. The dissolution kinetics of natural gypsum: a case study of Eocene facies in the north-eastern suburbs of Paris. *Environmental Earth Sciences*, (2021), 80 (1), pp.8.
- Guo J., Laouafa, F., Quintard, M. (2015). Dispersion in porous media with heterogeneous nonlinear reactions, *Transport In Pours Media. Transp Porous Med* (2015) 109:541–570
- Yang J, Yin Z-Y, Laouafa F, Hicher P-Y (2019). Analysis of suffusion in cohesionless soils with randomly distributed porosity and fine content. *Computers and Geotechnics* (2019); 111: 157-171.
- Xiaoyu Wang, Jun Yao, Liang Gong, Hai Sun, Yongfei Yang, Lei Zhang, Yang Lia, Wenchao Liu. Numerical simulations of proppant deposition and transport characteristics in hydraulic fractures and fracture networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 183 (2019)
- Xiaoyu Wang, Jun Yao, Liang Gong, Hai Sun, Yongfei Yang, Wenchao Liu, and Yang Li. Numerical study on particle transport and deposition in rough fractures. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles* 75, 23 (2020)
- Laura J. Pyrak-Nolte & David D. Nolte. Approaching a universal scaling relationship between fracture stiffness and fluid flow. *Nature Communications*, (2016), DOI: 10.1038/ncomms10663
- Xiaobing Chen, Jian Zhao, and Li Chen. Experimental and Numerical Investigation of Preferential Flow in Fractured Network with Clogging Process. *Mathematical Problems in Engineering* Volume (2014), Article ID 879189

POSITIONNEMENT ET PERSPECTIVES DE CARRIERE DE LA RECHERCHE

Cette thèse à la fois exploratoire et opérationnelle aura le double avantage, pour le(la) doctorant(e), qu'il(elle) puisse poursuivre son parcours et exercer les travaux et thématiques engagés au sein de la thèse tant dans un milieu industriel (domaines relatifs aux problématiques dans les massifs rocheux fracturés, acquisition de bases scientifiques ayant de fortes plus-values), qu'académique

(complexification des approches de modélisations couplés : continues, discontinues, mixtes) poste de chercheur ou enseignant-chercheur en Géomécanique / Géosciences.

Cette recherche à composantes fondamentale et appliquée s'inscrit dans une démarche vertueuse pour l'environnement : l'utilisation d'énergie verte décarbonée.

LIEU DE LA THESE

La thèse se déroulera à Verneuil-en-Halatte (Oise) et à l'Ecole Centrale de Nantes (Nantes).

PROFIL DU CANDIDAT

Le(la) candidat(e) est titulaire d'un Master 2 et/ou d'un diplôme d'Ingénieur en Géosciences, avec une mention et une base solide en mécanique des milieux continus, géomécanique et transferts en milieux poreux fracturés et en analyse numérique. Il/elle aime la modélisation et les développements numériques pour apporter une compréhension approfondie sur les mécanismes mis en jeu dans les phénomènes couplés multi-échelles et multi-physiques. Il/elle a un très bon niveau d'anglais. Il/elle a une capacité à prendre des initiatives, à travailler dans une équipe collaborative et à échanger des résultats avec les partenaires impliqués dans le projet, à la fois oralement et par écrit.

INFORMATION GENERALE

Démarrage : Septembre/Octobre 2025

Durée : 3 ans

Salaire brut (thèse Ineris) : environ 2200 € / mois

Type de contrat : CDD

DOSSIER DE CANDIDATURE

Le dossier de candidature doit comporter : un curriculum vitae, les copies des certificats de chaque diplôme universitaire et les notes obtenues, une lettre décrivant votre motivation et votre intérêt à travailler sur le sujet proposé et toute lettre de recommandation de vos enseignants et/ou encadrants.

ENCADREMENT / CONTACT

Encadrement : Ineris

Dr-HDR Farid Laouafa (Directeur de thèse)

Co-encadrement :

1. Prof. P-Y Hicher, Centrale Nantes (Co-Directeur de thèse)
2. Encadrant supplémentaire Prof. Zhenyu Yin Université polytechnique de Hong Kong

Soulignons que ces travaux de recherche s'effectueront en étroite collaboration avec l'ENPC et l'IFPEN.

Contacts :

M. Farid. Laouafa (farid.laouafa@ineris.fr)

Prof. Pierre-Yves Hicher (pierre-yves.hicher@ec-nantes.fr)

Ce poste est ouvert aux personnes en situation de handicap.