

## Modélisation du comportement d'un milieu poreux fracturé face à une sollicitation de gaz

Dans le cadre du projet Cigéo, le creusement des galeries souterraines dans les argilites du Callovo-Oxfordien induit un réseau de fractures autour des ouvrages. Cette fracturation présente un profil de propagation en mode mixte I/II typique, qui résulte de la décharge instantanée des argilites au moment du creusement. La topologie et l'étendue spatiale du réseau de fractures induit ont été largement étudiées par l'ANDRA<sup>1</sup> autour des ouvrages du Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne (LSMHM). Sur le long terme, ce réseau de fractures est par ailleurs amené à subir une sollicitation supplémentaire par les gaz (principalement H<sub>2</sub>) issus de la corrosion des métaux utilisés dans l'enveloppe des colis de déchets radioactifs ainsi que de la radiolyse de l'eau. L'accumulation de ces gaz induit une pressurisation pouvant affecter la zone fracturée. L'ANDRA a entrepris une étude des risques associés à la pressurisation du gaz dès 2003. Notamment, des essais de fracturation au gaz ont été réalisés dans un puits vertical foré depuis la surface et dans des forages creusés dans le LSMHM.

L'objectif de ce projet de thèse est la mise en place d'un outil numérique capable de modéliser et simuler la réponse mécanique d'un milieu poreux fracturé soumis à une sollicitation de gaz en tenant compte des couplages thermo-hydro-mécaniques (THM) particuliers des argilites. Le projet est organisé en trois volets : 1- mise en place de l'outil numérique, 2- étude numérique sous sollicitation THM en présence de gaz, et 3- confrontation expérience-simulation.

### Mise en place de l'outil numérique

On se propose de mettre en place la modélisation numérique en s'appuyant sur le code Disroc<sup>2</sup>. Disroc est un code élément fini dédié en particulier à la simulation des milieux fissurés. La prise en compte de la fissuration s'appuie sur les modèles de zones cohésives, bien adaptés aux milieux fragiles et quasi-fragiles. Ces modèles évitent les défauts principaux des modèles de Griffith, à savoir qu'ils ne présentent pas de singularité de contraintes en pointe de fissure et qu'ils permettent de simuler à la fois l'initiation et la propagation des fissures. Le code Disroc a déjà été utilisé pour l'étude de la fracturation dans le cadre de plusieurs thèses et projets de recherche dans différents organismes dont le laboratoire Navier. En particulier, la propagation de fracture sous l'effet de couplages THM soulève des questions spécifiques qui ont été abordées dans le cadre des thèses de Z. Ouraga<sup>3</sup> sur la fracturation naturelle des formations sédimentaires (réservoirs pétroliers) et de T. D. Vo<sup>4</sup> sur la fissuration par dessiccation des sols. Un travail de recherche plus récent<sup>5</sup> a permis de simuler la propagation des fractures sous l'effet d'une injection de fluides (Figure 1).

L'étude de la fissuration due à une sollicitation de gaz nécessite d'étendre ces travaux, fondés sur l'écoulement d'une seule phase de fluide incompressible, à l'écoulement d'un fluide biphasé (liquide + gaz) dans un milieu non saturé. Par ailleurs, ces écoulements sont potentiellement très sensibles aux nombreux couplages THM qu'ils induisent (pressurisation de fluide) ou subissent (gradients thermiques). Ces couplages sont un thème de recherche important au Laboratoire Navier et les avancées récentes permettent la prise en compte quantitative des effets d'adsorption associés à l'eau liée grâce à des formulations thermodynamiques rigoureuses de la poro-mécanique sous adsorption<sup>6,7</sup>. La modélisation numérique proposée dans ce travail visera à intégrer ces nouvelles formulations. L'implémentation des nouvelles formulations poro-mécaniques dans Disroc est relativement simple (formulation analytique avec la même structure que la poro-mécanique usuelle).

---

<sup>1</sup> Armand et al. (2014) *Rock Mech. Rock Eng.*, 47, 21-41. doi:10.1007/s00603-012-0339-6.

<sup>2</sup> Ouraga (2017) Modélisation de la fracturation naturelle des sédiments: impacts sur la modélisation de bassin. Thèse ENPC.

<sup>3</sup> Disroc (2016) A Finite Element code for modelling coupled THMC phenomena in porous fractured media. Fracsima, [www.fracsima.com](http://www.fracsima.com)

<sup>4</sup> Vo (2017) Modélisation Numérique et Analytique de la Fissuration de séchage des Sols Argileux. Thèse ENPC.

<sup>5</sup> Jung et al. (2019) Fracture Closure Mechanisms during Flowback from Hydraulic Fracture Networks, projet d'article.

<sup>6</sup> Brochard et al. (2012) *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 60(4), 606-622. <http://doi.org/10.1016/j.jmps.2012.01.001>

<sup>7</sup> Brochard et al. (2019) Thermo-poro-mechanics extended to adsorption effects and application to the anomalous thermal pressurization of interstitial water in undrained clays, soumis (JMPS)

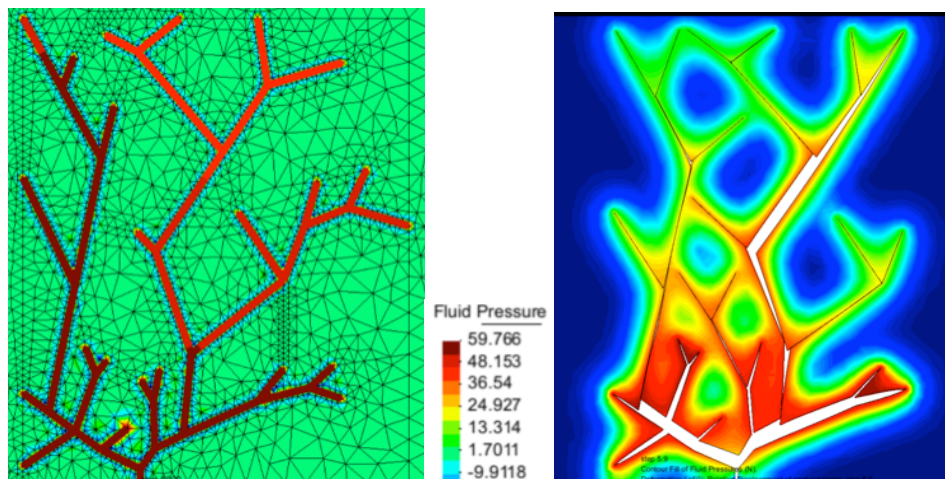


Figure 1 : Modélisation explicite des fractures produites par l'injection d'un fluide sous pression dans un milieu poreux<sup>8</sup>

### Etude numérique sous sollicitation THM en présence de gaz

Les paramètres de l'outil numérique seront calibrés de manière à reproduire le comportement de l'argilite du Callovo-Oxfordien. A cet effet, divers résultats expérimentaux disponibles dans la littérature ou obtenus dans d'autres projets ANDRA seront exploités. Les comportements des fluides non adsorbés (gaz, eau libre) seront pris en compte par les modèles usuels (gaz parfait, incompressible, ou bien loi d'état empirique si ces deux cas limites s'avèrent inappropriés dans la gamme de température-pression d'intérêt). Le comportement de l'eau liée sera obtenu par croisement des données expérimentales de couplages THM et de résultats de simulations moléculaires disponibles dans la littérature<sup>9</sup>.

L'outil numérique mis en place sera mis en œuvre sur des cas simples pour évaluer les principaux facteurs influençant la percée de gaz. Une attention particulière sera accordée au rôle des couplages THM particuliers de l'argilite (notamment : retrait/gonflement et pressurisation thermique).

### Confrontation expérience-simulation

Afin d'évaluer le modèle numérique mis en place, une confrontation à l'expérience est nécessaire. En accord avec l'ANDRA, le modèle numérique développé sera utilisé pour simuler des essais de fracturation au gaz réalisés au LSMHM ou d'autres essais réalisés pour le compte de l'ANDRA au cours de cette thèse. Les aspects 3D pourront être pris en compte dans des futures versions 3D du code Disroc qui deviendraient disponibles au cours de cette thèse.

### Détails pratiques et candidatures

Les candidats doivent être titulaires d'un master 2 recherche ou équivalent dans les domaines de mécanique et physique des (geo)-matériaux, avec un goût particulier pour les approches numériques. Les candidats intéressés doivent envoyer un CV, une lettre de motivation et leurs relevés de notes à L. Brochard (laurent.brochard@enpc.fr) ou A. Pouya (amade.pouya@enpc.fr) d'ici le **27 mars 2019**.

Localisation : laboratoire Navier (<https://www.navier-lab.fr>) situé à l'Ecole des Ponts ParisTech (6-8 avenue Blaise Pascal, 77455 Champs-sur-Marne, France)

Encadrement : Laurent Brochard et Amade Pouya (directeur de thèse)

Durée : 3 ans, début à l'automne 2019

Financement : une demande de financement sera déposée dans le cadre de l'appel à la candidature lancé par l'Agence nationale pour gestion des déchets radioactifs. Selon les règles d'éligibilités de l'ANDRA, les candidat(e)s doivent être **âgé(e)s de moins de 26 ans au 1er octobre 2019 et être citoyen(ne)s de l'Union Européenne**.

<sup>8</sup> Jung, (2018) Projet de Fin d'Etude ENPC.

<sup>9</sup> Honorio et al. (2017) Langmuir, 33(44), 12766-12776. <http://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b03198>