

## Modélisation de la percolation instable de gaz à travers les géomatériaux initialement saturés

*mots clés:* séquestration de CO<sub>2</sub>; stockage géologique; milieux poreux partiellement saturés; instabilité; modélisation par champ de phase

### Contexte

La modélisation de l'infiltration instable de gaz à travers une formation rocheuse saturée est un problème primordial dans un large éventail de problèmes d'ingénierie, en particulier dans les domaines du stockage de l'énergie, de la séquestration des gaz à effet de serre et de l'élimination des déchets radioactifs. La caractéristique commune à tous ces contextes est la possibilité que des fuites de gaz se vérifient à travers des fissures préexistantes et réactivées ou des nouveaux chemins développés à travers les formations géologiques/ barrières ouvragées.

Le stockage souterrain de gaz peut être associé à un large éventail d'applications d'ingénierie dans le domaine du génie civil et environnemental, mais aussi du génie chimique, des centrales nucléaires, etc. Entre autres, nous nous référons i) au stockage de l'énergie produite par tout type d'énergie renouvelable (éolienne, solaire ou centrale hydraulique) sous forme de méthane ou d'hydrogène de synthèse, et ii) à la dernière étape du processus CCS (Carbon Capture & Storage), finalisant le Captage de CO<sub>2</sub> via sa séquestration souterraine, dans des réservoirs d'hydrocarbures épuisés, des roches aquifères ou des cavernes souterraines artificielles. De plus, des conditions critiques peuvent être rencontrées entre un gaz et une formation géologique dans le stockage géologique de déchets radioactifs lorsque la corrosion du conteneur implique un dégagement de gaz et une accumulation de pression conséquente, conduisant éventuellement à la fracturation des barrières ouvragées ou de la formation isolant.

### Approche

Le projet vise à développer et à mettre en œuvre une nouvelle approche numérique à l'étude de l'écoulement d'un fluide multi-phasique à travers les milieux poreux, permettant de capturer les changements topologiques complexes dans les interactions liquide-gaz comme la digitation, le pincement et la coalescence d'une phase contre l'autre et d'analyser leurs effets sur la réponse mécanique du squelette poreux. Ces phénomènes ont été observés expérimentalement depuis les années 1990 comme se produisant dans des mélanges de fluides hétérogènes et caractérisés comme des instabilités d'une interface fluide-fluide évolutive. Cependant, ce n'est que récemment que leurs effets sur le comportement du solide poreux ont commencé à être étudiés expérimentalement et simulés numériquement.

En se basant sur les résultats déjà développés au sein de l'équipe de recherche qui pilote la présente thèse, une approche par champ de phase modélisant un milieu poreux partiellement saturé sera formulée dans le cas de phases non passives, mélangées de manière hétérogène dans le réseau poreux. Dans le cadre de la pomécanique des milieux continus, cela se fera en introduisant une énergie potentielle non-convexe caractérisée par un paramètre de concentration de phase, dont les deux valeurs limites sont associées aux phases du mélange. Le caractère non-convexe de la fonctionnelle sera régularisé à l'aide d'un apport énergétique pénalisant le gradient de concentration, de manière similaire au cas des fluides non uniformes de Cahn-Hilliard. Comme aucune restriction à la nature des fluides saturant l'espace poreux n'est pas supposée, une équation de diffusion d'ordre supérieur couplée avec au moins une loi de conservation sera formulée pour décrire l'évolution spatio-temporelle des deux phases. Considérant notamment le cas d'un gaz infiltrant un milieu poreux initialement saturé par une phase liquide, la compressibilité du gaz sera également prise en compte.

Étant donné que l'objectif du projet de recherche consiste à caractériser l'effet des instabilités fluides sur les déformations (irréversibles) et plus généralement sur la réorganisation matérielle du squelette poreux, un modèle plastique, par exemple de la famille Cam-Clay, qui prenne aussi en compte un terme énergétique fonction du gradient de déformation sera adopté. Cela permettra de modéliser la localisation des déformations au voisinage des structures de digitation.

Le modèle constitutif sera implémenté dans le code Éléments Finis LAGAMINE, développé depuis les années 1990 à l'Université de Liège, également en collaboration avec l'Ecole Centrale Nantes, pour caractériser le comportement des géomatériaux saturés et partiellement saturés. L'implémentation sera basée sur une approche mixte, réduisant ainsi l'équation de diffusion d'ordre supérieur, décrivant l'écoulement du fluide à travers le réseau poreux, à deux équations de diffusion du second ordre.

La simulation numérique des cas d'étude représentatifs de l'interaction d'un front de gaz avec une formation sol/roche initialement saturée par un fluide de défense sera développée dans le cadre des applications mentionnées ci-dessus.

### Résultats attendus

Les livrables du projet seront:

- Développement du modèle de comportement des milieux poreux partiellement saturés basé sur l'approche par champ de phase.
- Codage du sous-programme dans le cadre de la librairie Éléments Finis LAGAMINE implémentant le modèle de comportement.
- Simulation numérique d'au moins un cas d'étude: soit l'interaction du CO<sub>2</sub>, séquestré dans les roches aquifères avec la roche couverture, soit l'infiltration de gaz à travers des barrières techniques dans le stockage souterrain de déchets radioactifs.

### Compétences requises

- Une compétence en mécanique des milieux continus est requise.
- La modélisation de la réponse plastique des solides est recommandée.
- Des compétences en codage FORTRAN ou C++ sont fortement recommandées.

### Informations complémentaires & Contacts

La thèse sera en co-tutelle entre l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Liège; le/la doctorant/e passera la moitié de son cursus doctoral à Nantes et l'autre moitié à Liège.

*Directeur de thèse:* Professeur Giulio SCIARRA

Institut de Génie Civil et Mécanique (GeM), Ecole Centrale de Nantes, [giulio.sciarra@ec-nantes.fr](mailto:giulio.sciarra@ec-nantes.fr)

*Co-Directeur de thèse:* Professeur Frédéric COLLIN

GEO<sup>3</sup> - Département ArGEnCo, Université de Liège, [f.collin@uliege.be](mailto:f.collin@uliege.be)

*Co-Encadrant de thèse:* Dr. Siddhartha Harsha OMMI

Institut de Génie Civil et Mécanique (GeM), Ecole Centrale de Nantes, [siddhartha-harsha.ommi@ec-nantes.fr](mailto:siddhartha-harsha.ommi@ec-nantes.fr)

**N.B.** Un Curriculum Vitae, une lettre de motivation et le relevé de notes doivent être téléchargés sur le site internet du [Thèses en Bretagne Loire](#) pour toute candidature. Par ailleurs, pour accuser réception de candidature, ou pour toute autre question, des emails peuvent être adressés à [siddhartha-harsha.ommi@ec-nantes.fr](mailto:siddhartha-harsha.ommi@ec-nantes.fr).