

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Développement d'une méthode éléments finis enrichis dans le cadre d'une approche variationnelle : application à la modélisation des comportements THM des argilites et des ouvrages

Jean-Baptiste Colliat, Jianfu Shao
LaMcube, UMR9013 CNRS

Laboratoire : LaMcube, Univ. Lille, Centrale Lille, CNRS, www.lamcube.univ-lille.fr

Lieu de réalisation : bâtiment ESPRIT, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq

Financement : contrat doctoral, 2044€ bruts par mois pendant 36 mois

Date de démarrage envisagée : 1^{er} octobre 2023

Contexte :

Dans le contexte du stockage géologique des déchets radioactifs, la modélisation des zones endommagées et fissurées induites par l'excavation et l'augmentation de température est un sujet primordial. L'évolution à long terme de ces zones, par exemple par le processus d'autocolmatage, affecte la sûreté du stockage.

Pendant plusieurs décennies, un grand nombre d'études expérimentales en laboratoire et *in situ* ont été réalisées pour étudier les processus de fissuration sous différents types de sollicitations, notamment le chargement thermique. Dans le même temps, différents types de modèles de comportement et de méthodes numériques ont été développés pour décrire les comportements THM des argilites du Cox, l'évolution des zones de fissuration au tour des cavités et de galeries.

Parmi les principales méthodes numériques utilisées, on peut distinguer les approches basées sur la mécanique des milieux continus et celles considérant des milieux discrets. Pour la modélisation des expérimentations *in situ* et des futurs ouvrages de stockage en configuration 3D, les approches en milieux continus représentent le choix principal car elles sont physiquement fondées.

Pour décrire la nucléation et la propagation de fissures à différentes échelles dans le cadre de ces approches continues, on peut citer de nombreux modèles plastiques et d'endommagement non-locaux ou à gradient. Les fissures sont représentées par des bandes de localisation de déformation ou d'endommagement. Les discontinuités de déplacement liées à l'évolution des fissures ne sont pas explicitement prises en compte. Afin de décrire ces discontinuités, des approches incorporant des « discontinuités fortes » ont été imaginées. Leur déclinaison pratique a conduit aux méthodes X-FEM, G-FEM et E-FEM (entre autres). La première présente de multiples avantages mais son utilisation 3D et dans le cas de fissures multiples reste compliquée.

Basée sur un enrichissement élémentaire, la méthode E-FEM, en revanche, permet de traiter ces discontinuités au niveau élémentaire, comme des lois de comportement. Son implémentation numérique est donc relativement aisée. La méthode E-FEM peut être facilement utilisée pour des problèmes 3D et dans le cas de multiples fissures. Notre équipe travaille sur cette méthode depuis de longues années et a acquis une expertise reconnue (voir Sun et al.

2021a, 2021b pour nos travaux récents). Cependant, la description de la nucléation des fissures de façon physiquement fondée demeure un problème pour les approches à « discontinuités fortes ». En particulier, on sait aujourd’hui que les critères de nucléation en contraintes sont trop simplistes pour être prédictifs.

Basée sur l’approche variationnelle de la mécanique de la rupture (Francfort et al. 1998 ; Bourdin et al. 2000), la méthode dite « champ de phase » a connu des avancées significatives pendant ces dernières années. Ici, le problème de nucléation et de propagation des fissures est résolu par la minimisation d’une fonctionnelle énergétique globale. Elle est ainsi capable de traduire naturellement la transition d’un endommagement diffus à la fissuration localisée. Notre équipe a largement travaillé sur cette méthode pendant ces dernières années et nous avons développé de nouveaux modèles de champ de phase pour des problèmes de couplage THM. Cependant, les fissures discontinues sont approximées par une densité de fissuration volumique. Le résultat est donc un ensemble de bandes d’endommagement localisées, sans description quantitative des ouvertures de fissures. L’objectif principal du travail présenté ici consiste donc à développer une nouvelle méthode E-FEM dans le cadre d’une approche variationnelle énergétique. La méthode ainsi obtenue devra être capable de décrire la nucléation, la propagation et l’ouverture d’un ensemble de fissures en 3D et en tenant compte des couplages THM.

Description du sujet :

Le travail de thèse est composé de trois parties :

1. La formulation théorique d’une approche variationnelle combinant la mécanique de la rupture et la méthode E-FEM.
2. L’extension de cette formulation aux couplages thermo-hydrromécaniques. Notamment, l’évolution de la perméabilité des zones fissurées sera déterminée en fonction des discontinuités de déplacement de fissures. Des méthodes d’homogénéisation analytique et numérique seront utilisées.
3. L’implémentation numérique dans un ou plusieurs codes de calcul par EF (à définir), la validation par confrontation à des solutions analytiques connues et l’application de la méthode proposée.
 - a. La nouvelle méthode sera implémentée dans le cadre standard des éléments finis en utilisant une technique de minimisation partitionnée (couplage entre différentes instances d’un code de calcul). Un certain nombre d’essais en laboratoire, sans et avec couplage THM, seront d’abord considérés. On vérifiera la pertinence et l’efficacité de la nouvelle méthode, ainsi qu’une stratégie d’identification des paramètres.
 - b. Par la suite, la méthode proposée sera appliquée à la modélisation des ouvrages. Les résultats numériques seront comparés aux observations en termes de zone fracturée, de convergence des parois et d’évolution de la pression interstitielle.

Références

- Bourdin B, Francfort GA, Marigo JJ, Numerical experiments in revisited brittle fracture, *J. Mech. Phys. Solids* 48 (4) (2000): 797–826
- Francfort GA, Marigo JJ, Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem, *J. Mech. Phys. Solids* 46 (8) (1998): 1319–1342
- Sun Y, Roubin E, Shao JF, Colliat JB, FE modeling of concrete with strong discontinuities for 3D shear fractures and comparison with experimental results, *Engineering Fracture Mechanics* 251 (2021) 107752, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107752>
- Sun Y, Roubin E, Shao JF, Colliat JB, Strong discontinuity FE analysis for heterogeneous materials: The role of crack closure mechanism, *Computers and Structures* 251 (2021) 106556, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106556>

- Yu Z, Sun Y, Vu MN, Shao JF*, Modelling of mixed cracks in rock-like brittle materials under compressive stresses by a double phase-field method, *Rock Mechanics and Rock Engineering* (2023), <https://doi.org/10.1007/s00603-022-03196-w>
- Yu Z, Shao JF, Duveau G, Vu MN, Armand G, Numerical modeling of deformation and damage around underground excavation by phase-field method with hydromechanical coupling, *Computers and Geotechnics* 138 (2021) 104369, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104369>
- Yu Z, Shao JF, Vu MN, Armand G, Numerical study of thermo-hydro-mechanical responses of in situ heating test with phase-field model, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 138(2021), 104542, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104542>
- Wang M, Yu Z, Shen WQ, Shao JF, Numerical study of time-dependent deformation and cracking in brittle rocks with phase-field method and application to slope instability analysis, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 155 (2022), 105144, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105144>
- Wang M, Shen WQ, Liu JF, Shao JF, Phase-field modeling of cracking process in partially saturated porous media and application to rainfall-induced landslides, *Engineering Geology* 310 (2022), 106884, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106884>
- Wang M, Cormery F, Shen WQ, Shao JF, A novel phase-field model for mixed cracks in elastic-plastic materials incorporating unilateral effect and friction sliding, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 405 (2023) 115869, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.115869>