

OFFRE DE THESE

Interactions eau–gaz–roche en zone endommagée de stockages souterrains : approche numérique pour le projet Cigéo

Nos réf. : Ineris - 235565 - ID 2861806

Début de la thèse : Octobre 2026

Lieu : Ineris (54) – Ecole des Mines de Nancy, à 1h30 mn de Paris en TGV

Type de contrat : contrat doctoral de droit privé

Contact : Mountaka.Souley@ineris.fr - Tél. : 03 54 40 66 33 pour plus d'information

Contexte scientifique

La gestion sûre des déchets nucléaires en stockage profond repose en grande partie sur la stabilité et l'étanchéité des ouvrages creusés dans des formations argileuses (Europe), comme le Callovo-Oxfordien (COx), roche hôte du projet Cigéo de l'Andra, l'un des systèmes de confinement géologique les mieux documentés au monde (Armand et al., 2013 ; 2017a ; Conil et al., 2020).

Lors du creusement de galeries, une zone endommagée (EDZ) se développe autour de ces ouvrages (Fig. 1), marquée par une fracturation induite évoluant sous l'effet de l'eau, du gaz et des contraintes thermiques et mécaniques. Malgré une littérature abondante sur les propriétés multiphysiques du COx, certains mécanismes clés restent mal compris ou peu intégrés aux modèles à l'échelle de l'ouvrage.

Les modèles couplés thermo-hydro-mécaniques (THM), majoritairement continus, reproduisent certaines observations de terrain (Manica et al., 2022 ; Alonso et al., 2024 ; Souley et al., 2024), mais peinent à décrire finement la fracturation, sa géométrie, sa dynamique et ses effets en champ proche, pourtant essentiels dans l'évaluation de la stabilité des ouvrages de stockage en exploitation et post-fermeture. En effet, le COx est globalement continu, mais son comportement devient discontinu localement au sein de l'EDZ. Les approches discontinues (DEM, FDEM) et mixtes continu–discontinu constituent aujourd'hui une alternative pertinente aux modèles continus classiques. Elles permettent de mieux appréhender la genèse et la propagation des fractures, ainsi que de caractériser l'EDZ et son évolution sous sollicitations thermo-hydro-mécaniques, donc plus appropriées pour analyser et prendre en compte l'EDZ dans la conception et l'évaluation des ouvrages de fermeture ou d'expérimentations spécifiques de Cigéo (Camusso et al., 2022 ; Ouraga et al., 2025 ; Thoraval et al., 2026), mais présentent encore des verrous scientifiques importants.

Dans ce contexte, il est nécessaire de développer une approche multi-échelle et multiphysique pour mieux comprendre et prévoir l'évolution de la fracturation au sein de l'EDZ et garantir la performance et l'intégrité à long terme des ouvrages de stockage souterrain comme le centre de stockage de déchets radioactifs Cigéo.

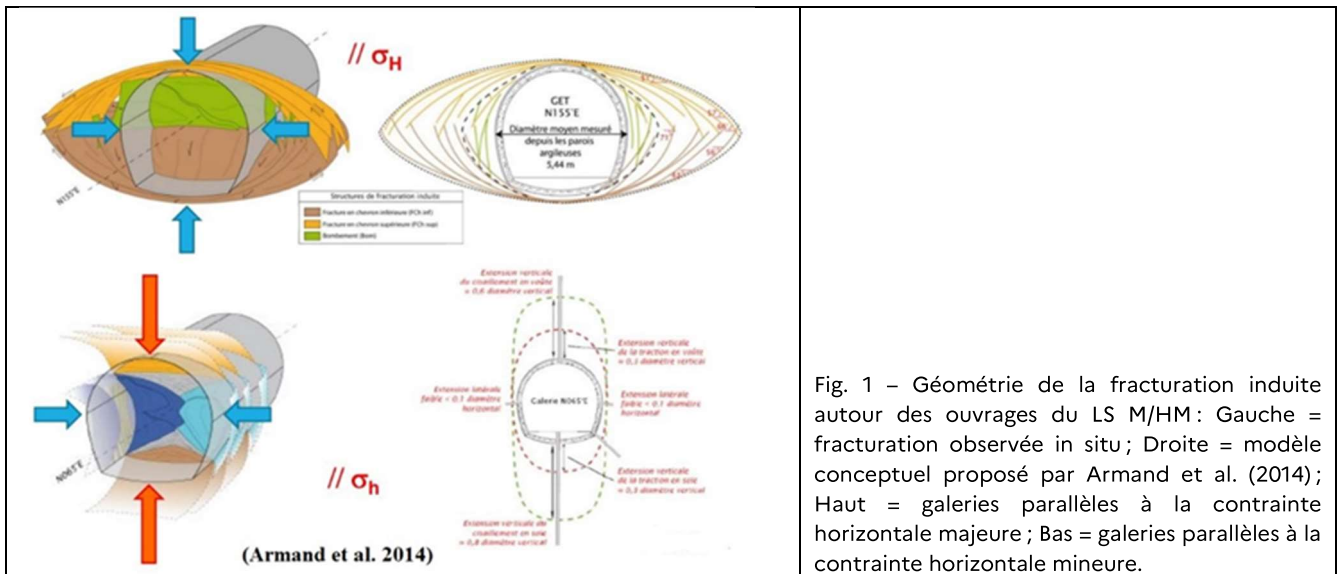


Fig. 1 – Géométrie de la fracturation induite autour des ouvrages du LS M/HM : Gauche = fracturation observée in situ ; Droite = modèle conceptuel proposé par Armand et al. (2014) ; Haut = galeries parallèles à la contrainte horizontale majeure ; Bas = galeries parallèles à la contrainte horizontale mineure.

Sujet de la thèse

L'état de l'art sur le COx met en évidence la complexité des comportements thermo-hydro-mécaniques de l'argilite (Souley et al., 2026 ; Vu et al., 2026), marqués par des interactions fortement couplées et dépendantes de l'échelle (Armand et al., 2013 ; 2017b). Leur compréhension et leur modélisation requièrent une approche multi-échelle intégrant de manière cohérente données expérimentales, observations in situ et modèles continus et discontinus. Cette thèse s'inscrit dans ce cadre, en lien avec notre partenariat scientifique avec l'Andra.

Les travaux exploratoires de Camusso et al. (2022) et Thoraval et al. (2026) ont ouvert la voie à des modèles numériques 2D/3D capables de reproduire la géométrie des réseaux de fractures induites et leur mobilisation sous sollicitations hydromécaniques. Toutefois, ces modèles basés sur l'approche DEM avec le logiciel 3DEC restent fortement pénalisés par leur coût de calcul dès lors que les couplages multiphysiques sont pris en compte. Dans cette thèse, il s'agit de proposer une alternative fondée sur une méthodologie de modélisation multi-échelle (ouvrage → quartier → stockage) et multi-temporelle (dimensionnement, exploitation, fermeture), reposant sur une approche mixte (continue/discontinue) intégrant les processus multiphysiques couplés, tant dans la matrice argileuse (COx) que dans les fractures induites et leur cinétique d'évolution. Cette méthodologie permettra notamment :

- De comprendre la formation, l'évolution et l'impact de la fracturation autour des ouvrages de stockages souterrains ;
- D'étudier l'influence des sollicitations hydrauliques (eau), gazeuses (gaz) et mécaniques sur l'activation et la propagation des fractures ;
- D'évaluer les conséquences de l'évolution de la fracturation sur la performance et l'évaluation de la stabilité des ouvrages de fermeture du centre de stockage Cigéo en particulier, et des stockages souterrains en général.

Au-delà du cadre spécifique de Cigéo, cette recherche contribuera à des avancées fondamentales dans la compréhension du comportement des milieux poreux fracturés, des transferts multiphasiques et de la réponse mécanique des matériaux poreux soumis à des sollicitations couplées. Elle ouvre ainsi des perspectives d'applications à d'autres contextes de stockage souterrain, impliquant différentes roches hôtes et environnements géologiques.

Ce que tu feras concrètement

- **Analyse de données de terrain** : Tu exploiteras une base de données unique issue de plus de 20 ans de mesures in situ (pression, déformations, fracturation...) et d'essais de laboratoire pour comprendre le comportement de la formation et l'évolution de la zone endommagée (EDZ) autour des ouvrages de Cigéo.
- **Modélisation numérique 2D/3D (Eléments Distincts, Eléments Finis)** : Tu développeras et utiliseras des modèles innovants (discontinus ou mixtes) initiés dans les travaux exploratoires (Thoraval et al. 2026) pour simuler la fracturation, son évolution dans le temps, et l'impact des sollicitations hydrauliques, gazeuses et mécaniques, ainsi que les interactions eau-gaz-roche résultantes.
- Ta démarche sera basée sur **une augmentation progressive en complexité du comportement de la matrice et des fractures** : linéaire → non linéaire, anisotropie, effets différés, couplage hydromécanique en saturé monophasique (eau, gaz).
- **Validation fondée sur la comparaison avec les mesures de terrain et les prédictions des modèles continus du CO_x décrits dans la littérature** : Tu confronteras tes simulations aux observations réelles, proposeras de nouvelles interprétations des mesures si besoin, et participeras à l'enrichissement des modèles sur la base des avancées scientifiques récentes et à l'interprétation des mécanismes physiques en jeux.
- **Évaluation de la stabilité des ouvrages souterrains** : Tu analyseras les conséquences de l'évolution de la fracturation sur la stabilité à court, moyen et long terme et la performance des ouvrages de fermeture du centre de stockage Cigéo.
- **Travail en équipe et communication** : Tu collaboreras avec des spécialistes reconnus (Ineris, Université de Lorraine, Andra), présenteras tes résultats lors de réunions, séminaires et congrès, et participeras à la vie scientifique d'une équipe dynamique et internationale.

Pourquoi ce sujet est passionnant ?

- **Un enjeu de société concret** : Tes travaux contribueront directement à la sécurité environnementale et à la gestion responsable des déchets radioactifs les plus dangereux.
- **Un terrain d'expérimentation unique** : Tu auras accès à un laboratoire souterrain de référence mondiale, avec des données et des installations exceptionnelles.
- **Une aventure scientifique et humaine** : Tu seras intégré dans une équipe dynamique, pluridisciplinaire et internationale.
- **Des compétences variées et valorisantes** : Tes travaux te conduiront à développer tes compétences en modélisation, analyse de données, interprétation d'expérimentations, communication scientifique...
- **Des débouchés larges** : A l'issue de ta thèse, au vu des compétences développées ou acquises durant ton parcours, tu pourras t'orienter vers l'industrie, la recherche publique, l'enseignement supérieur, en France et à l'international.

Pour qui ?

- Master 2 ou diplôme d'ingénieur en géosciences, génie civil, mécanique, physique, ou domaines proches.

- Motivé(e) par les grands défis environnementaux et industriels.
- Curieux, motivé par les échanges, réflexions et communications scientifiques.
- Envie de comprendre, modéliser, confronter, et de voir l'impact concret de tes travaux.

Une bonne maîtrise de l'anglais scientifique (lecture, rédaction, communication orale) est indispensable.

Les plus du projet

- **Encadrement de qualité par une équipe mixte** (Ineris, Université de Lorraine).
- **Rémunération attractive** : salaire annuel brut de 27 530€ (2 130€ * 12,5 + 905€ de prime).
- Contrat de 39 h/semaine. 18 RTT en plus des 31 CP annuels. Titres restaurants.
- **Mobilité et réseau** : déplacements en France et à l'étranger, participation à des congrès.

Tes travaux se dérouleront au sein de l'unité *Risques Naturels, Ouvrages et Stockages* de l'Ineris, dans une équipe dynamique (dix ingénieurs dont trois HDR, une doctorante) de modélisation THMC spécialisée dans le comportement des géomatériaux et le dimensionnement des ouvrages en milieux continus et discontinus.

Dossier de candidature

- **Date limite de candidature** : 1er juillet 2026
- **Documents à fournir** :
Curriculum vitae - Copies des certificats de chaque diplôme universitaire et notes obtenues - Lettre de motivation - Toute recommandation de vos enseignants et/ou encadrants.
La connaissance de Comsol Multiphysics (Mécanique/Ecoulement) ; Mécanique/Hydraulique de fractures constituera un atout.
- **Eligibilité** :
Tou(te)s les candidat(e)s intra-communautaires - Candidat(e)s extra-communautaires ayant déjà un statut d'étudiant(e) en France - Titulaire un diplôme de Master ou équivalent - Compétences en français et/ou anglais : écrit et oral.

Contact

- **M. Souley**
Ineris - Campus ARTEM - Ecole des Mines de Nancy - CS 14234 F-54042 Nancy Cedex
Tel: +33 (0)3 54 40 66 33, Email: Mountaka.Souley@ineris.fr
- **F. Golfier**
UMR 7359 GeoRessources, ENSG, Université de Lorraine - 54505 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex
Tel: +33 (0)3 72 74 45 63, Email: Fabrice.Golfier@univ-lorraine.fr

Information sur l'Ineris

L'Ineris (Institut national pour l'environnement industriel et des risques), qui compte environ 500 collaborateurs, est un organisme national de référence, sous tutelle du ministère chargé de l'environnement, dont la mission principale est de réaliser des études et des recherches permettant de prévenir les risques que les activités économiques font peser sur la sécurité des personnes et des biens.

Rejoindre l’Ineris c’est l’opportunité de mettre en œuvre et développer ses compétences dans le cadre des missions de recherches, d’appui et d’expertise pour le compte des pouvoirs publics et des industriels. L’Ineris dispose de 30 000 m² de laboratoires et halles d’essais avec des équipements multiples et à la pointe de la technologie.

Références

- Alonso M, Vaunat J, Vu M-N, Talandier J, Olivella S, Gens A. 3D modelling of a large-diameter sealing concept for HLW disposal. *Rock Mech Rock Eng.* 2024
- Armand G, Noiret A, Zghondi J, Seyedi D. (2013) Short- and long-term behaviors of drifts in the COx claystone at the Meuse/haute-marne URL. *J Rock Mech Geotech Eng.* 2013;5(3):221–230
- Armand G, Leveau F, Nussbaum C, de La Vaissiere R, Noiret A, Jaeggi D, Landrein P, Righini C (2014) Geometry and properties of the excavation induced fractures at the Meuse/Haute-Marne URL drifts. *Rock Mech Rock Eng* 47(1):21–41. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0339-6>
- Armand G, Bumbieler F, Conil N, de La Vaissière R, Bosgiraud J-M, Vu M-N. (2017a) Main outcomes from in situ THM experiments to demonstrate feasibility of HLW disposal in COx claystone. *J Rock Mech Geotech Eng.* 2017;9(3):415–427
- Armand G, Conil N, Talandier J, Seyedi D. (2017b) Fundamental aspects of the hydromechanical behaviour of callovo-oxfordian claystone: from experimental studies to model calibration and validation. *Comput Geotech.* 2017;85:277–286
- Camusso M., H. Tran-Manh, D. Billaux, M.N. Vu, O. Ozanam (2022) - CIGEO project - Analysis of ILW-LL repository tunnel long term behavior. *Clay2022 Conf. Nancy, June 2022*
- Conil, N., Vitel, M., Plua, C., Vu, M. N., Seyedi, D., Armand, G. (2020) In situ investigation of the THM behavior of the Callovo-Oxfordian claystone, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020
- Mánica MA, Gens A, Vaunat J, Armand G, Vu MN (2022) Numerical simulation of underground excavations in an indurated clay using non-local regularisation. Part 1: formulation and base case. *Geotechnique* 72(12):1092–1112
- Ouraga Z., C Plúa, MN Vu, G Armand (2025) Thermo-hydro mechanical coupling in a discrete modelling: Large-scale 3D application to thermal hydrofracturing. *Geomechanics for Energy and the Environment* 41, 100656. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2025.100656>
- Souley, M., Coarita-Tintaya, E.D., Vu, M.N., Golfier, F., Armand, G., Laviña, M., Idiart, A. (2024). A Regularised Anisotropic Elastoplastic Damage and Viscoplastic Model and Its Hydromechanical Application to a Meuse/Haute-Marne URL Drift. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57, 4389–4419
- Souley M., C. De Lesquen, M.-N. Vu, G. Amand (2026) - Advanced thermo-hydro-mechanical modelling of Callovo-Oxfordian claystone: Temperature effects and multi-scale applications for geological disposal safety. *Int J Rock Mech & Min Sci* 199 (2026) 106397
- Thoraval A., M. Souley, M.N. Vu (2026) Hydromechanical modelling of damaged zone around underground storage facilities. *CouFrac2026*
- Vu M.-N. et al. (2026) - A review of 35 years in developing constitutive models for the Callovo-Oxfordian claystone behaviour. *Rock Mechanics and Rock Engineering* (under review)

Notre offre d’emploi est ouverte à tous, nous souhaitons intégrer nos nouveaux talents au sein d’un environnement de travail inclusif.