

Centre de Géosciences – Offre de thèse

Étude multi-échelle du comportement mécanique du sel gemme

1. Contexte

Le cadre de cette recherche est le comportement mécanique à long terme du sel gemme et la nécessité de développer des lois de comportement ayant de bonnes capacités prédictives dans le moyen et le long terme. Le sel gemme est une roche ayant des propriétés très intéressantes pour le stockage souterrain, et, de ce fait, les cavités salines ont été utilisées depuis plusieurs décennies pour stocker des hydrocarbures et d'autres substances. Par ailleurs, plusieurs pays étudient la possibilité de stocker les déchets radioactifs exothermiques dans des formations salines. Dans le contexte de la transition énergétique bas carbone, le stockage souterrain jouera un rôle très important. Ainsi, des centaines de nouvelles cavités salines seront créées en Europe dans les années à venir, et des cavités de gaz naturel existantes pourraient être converties pour le stockage de l'hydrogène. Les études de faisabilité et de stabilité à long terme de ces infrastructures (phases d'opération et d'abandon) doivent être basées sur des lois constitutives dont les prédictions peuvent être extrapolées sur de longues durées avec une incertitude maîtrisée. Toutefois, le développement de telles lois reste un défi majeur, en raison de la microstructure complexe du sel gemme, qui doit être mieux comprise.

2. Description du projet de thèse

Actuellement, dans la pratique courante de l'ingénierie, le comportement du sel gemme est modélisé moyennant de lois constitutives macroscopiques, développées à l'aide des résultats d'essais en laboratoire sur des échantillons centimétriques (approche phénoménologique). La durée de ces essais est inévitablement beaucoup plus courte que les échelles de temps pertinentes pour les installations souterraines. Ceci est délicat, car le comportement mécanique du sel gemme dépend du temps (fluage). Afin de réduire les incertitudes associées à l'extrapolation à long terme, par exemple pendant la phase d'exploitation des cavités (*e.g.*, estimation de leur convergence) et aussi pendant la phase d'abandon (*e.g.*, suivi de la pression et de la convergence, gestion de la saumure, opérations en tête du puits), cette thèse de doctorat vise à améliorer les capacités prédictives des lois constitutives en enrichissant les observations macroscopiques avec des considérations physiques à l'échelle microscopique (où les mécanismes qui régissent le fluage opèrent). A cette fin, des essais en laboratoire sur des échantillons à l'échelle centimétrique seront combinés avec des analyses à l'échelle microscopique réalisées avant et après les essais. Différentes techniques de changement d'échelle seront étudiées. Les résultats de l'étude seront intégrés dans des lois constitutives, qui seront implémentées dans un logiciel basé sur la méthode des éléments finis (développé dans le Centre de Géosciences), et des simulations de plusieurs scénarios de stockage et d'abandon seront effectuées. La thèse de doctorat sera réalisée dans le cadre d'un projet de recherche européen réunissant des modélisateurs, des expérimentateurs et des exploitants de cavités salines. Le doctorant travaillera au sein d'une équipe internationale comprenant des chercheurs complémentaires qui travaillent à différentes échelles spatiales (de la microstructure à l'échelle de la cavité saline).

3. Références

- Blanco-Martín L., Rouabhi A., Hadj-Hassen F., Jaworowicz J., Azabou M., Hévin G., Labaune P. (2024). Creep of rock salt under a large range of deviatoric stresses. Rock Mechanics and Rock Engineering. [doi:10.1007/s00603-024-03841-6](https://doi.org/10.1007/s00603-024-03841-6)
- Azabou, M., Rouabhi, A., Blanco-Martín, L., Hadj-Hassen, F., Karimi-Jafari, M., Hévin, G. (2021). Rock salt behavior: From laboratory experiments to pertinent long-term predictions. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 142, 104588. [doi:10.1016/j.ijrmms.2020.104588](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104588)
- Azabou, M. (2021). Modélisation et prédiction du comportement macroscopique du sel gemme dans le contexte du stockage souterrain. PhD thesis, Ecole des Mines de Paris. <https://pastel.hal.science/tel-03282134>

4. Mots-clés

Sel gemme ; approche multi-échelle ; essais macroscopiques en laboratoire ; aspects microstructuraux ; modélisation ; stockage souterrain ; transition énergétique bas carbone

5. Compétences nécessaires

Connaissances en mécanique des roches et en mécanique des milieux continus

Connaissances en thermodynamique

Expérience en programmation et modélisation

Maîtrise de l'Anglais et si possible du Français

Volonté pour travailler dans un environnement multidisciplinaire et international

Volonté pour s'investir dans le travail expérimental en laboratoire

6. Les dossiers de candidature sont à envoyer à l'adresse laura.blanco_martin@minesparis.psl.eu avant le 10 Mai 2024 et doivent être constitués de :

- a. Un CV
- b. Une lettre de motivation
- c. Les notes des études universitaires, y compris master
- d. Diplôme attestant le niveau d'Anglais (si disponible)
- e. Nom et coordonnées de trois références
- f. Un document scientifique rédigé par le candidat (en Anglais ou Français)

Le début de la thèse est prévu pour la période Septembre-Décembre 2024. Le lieu principal de travail sera le Centre de Géosciences de Mines Paris à Fontainebleau (77)

Centre for Geosciences and Geoengineering – PhD position announcement

Multi-scale approach for the mechanical behavior of rock salt

1. Context

The framework of this research is the time-dependent mechanical behavior of rock salt and the need to develop constitutive models that have good predictive capabilities in the mid to long-term. Rock salt has very interesting properties for underground storage and disposal, and salt caverns have been used for decades to store hydrocarbons and other substances. In addition, several countries are considering disposing of heat-generating nuclear waste in rock salt formations. As part of the energy transition to low-carbon sources, underground storage will play a very important role. Hundreds of new salt caverns will be created in Europe in the coming years, and existing natural gas caverns may be converted to hydrogen storage. Studies of the feasibility and long-term stability of such facilities (operation and post-closure phases) need to be based on constitutive laws whose predictions can be extrapolated accurately over long periods of time. However, the development of such laws is still a major challenge, due to the complex microstructure of rock salt, that needs to be better understood.

2. PhD research project outline

Currently, in standard engineering practice, the behavior of rock salt is modeled using macroscopic constitutive creep laws, based on the results of laboratory tests on centimetric-scale samples (phenomenological approach). The duration of such tests is inevitably much shorter than the relevant time scales of the target underground facilities. This is delicate, as the mechanical behavior of rock salt is time-dependent (creep). In order to reduce the uncertainties associated with long-term extrapolation, for instance during cavern operation (*e.g.*, estimates of cavern volume) and during cavern abandonment (*e.g.*, monitoring of cavern pressure and volume, brine management, operations at the well head), this PhD thesis aims at improving the predictive capabilities of constitutive laws by enriching macroscopic observations with physical considerations at the microscopic scale (where the mechanisms governing creep operate). To this end, laboratory tests on centimetric-scale samples will be combined with microscopic analyses performed before and after the experiments. Different upscaling techniques will be investigated. The results of the study will be integrated into constitutive laws, which will be implemented in dedicated in-house developed FEM software to simulate several storage scenarios, as well as the abandonment phase of salt caverns. The PhD thesis will be performed in the context of a European research project including modelers, experimentalists and salt cavern operators. The PhD student will benefit from an international team including complementary researchers that work at different spatial scales (from the microstructure to the salt cavern scale).

3. References

- Blanco-Martín L., Rouabhi A., Hadj-Hassen F., Jaworowicz J., Azabou M., Hévin G., Labaune P. (2024). Creep of rock salt under a large range of deviatoric stresses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. [doi:10.1007/s00603-024-03841-6](https://doi.org/10.1007/s00603-024-03841-6)
- Azabou, M., Rouabhi, A., Blanco-Martín, L., Hadj-Hassen, F., Karimi-Jafari, M., Hévin, G. (2021). Rock salt behavior: From laboratory experiments to pertinent long-term predictions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 142, 104588. [doi:10.1016/j.ijrmmms.2020.104588](https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2020.104588)
- Azabou, M. (2021). Modélisation et prédiction du comportement macroscopique du sel gemme dans le contexte du stockage souterrain. PhD thesis, Ecole des Mines de Paris. <https://pastel.hal.science/tel-03282134>

4. Keywords

Rock salt; multi-scale approach; macroscopic laboratory testing; microstructural considerations; modeling; underground storage; energy transition to low-carbon sources

5. Prerequisite skills

Geomechanics and continuum solid mechanics

Basis of thermodynamics

Programming and modeling experience

Fluent in English (oral, spoken, written) and preferably French

Eager to work in a multidisciplinary, international environment

Eager to get involved in laboratory experiments

6. Applications should be sent to laura.blanco_martin@minesparis.psl.eu before May 10 2024 and include:

- a. CV
- b. Cover letter
- c. MSc and BSc transcripts
- d. Proof of English proficiency (not mandatory but highly appreciated)
- e. Names and contact information of three references
- f. A scientific document written by the candidate (English or French)

The successful candidate is expected to join the Centre for Geosciences and Geoengineering (located in Fontainebleau) during the period September-December 2024