

OFFRE DE THÈSE

STABILITÉ ET COMPORTEMENT DES CAVITÉS SALINES SOUS SOLlicitATIONS SISMIQUES : APPLICATION AU STOCKAGE SOUTERRAIN D'HYDROGÈNE

Type de contrat : Contrat doctoral de droit privé.

Début de la thèse : Octobre 2025

Localisation : Verneuil-en-Halatte (60) à 40 mn au nord de Paris.

Accès : Une navette privée et gratuite assurant la liaison entre la gare de Creil et notre site est à votre disposition.

Télétravail : 100 jours par an

Contacts pour plus d'informations : Hippolyte DJIZANNE (hippolyte.djizanne@ineris.fr) - Tél. : +33 (0) 3 44 55 65 61

CONTEXTE

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.

CONTEXTE ET MOTIVATIONS DE LA THÈSE

Le stockage d'hydrogène dans des cavités salines souterraines constitue l'un des maillons nécessaires au développement de la filière hydrogène renouvelable. Le projet FrHyGe, soutenu et subventionné par l'Union européenne via le Clean Hydrogen Partnership, a pour but de valider ce maillon à une échelle industrielle. Il prévoit pour cela la mise en œuvre d'un démonstrateur sur le site de stockage souterrain de Manosque et l'étude de la répliquabilité de

cette technologie sur le site de Harsefeld en Allemagne et plus largement à l'échelle de l'Europe.

Inscrite dans le cadre du projet FrHyGe, la thèse de doctorat abordera l'un des défis spécifiques associés au stockage dans des cavités salines souterraines, en particulier dans les régions exposées à la sismicité naturelle et induite : la sécurité et la stabilité sous chargement sismique.

Manosque, située dans le sud-est de la France, constitue une étude de cas clé en raison de son histoire sismique, notamment marquée par les séismes de 1509 et 1708, qui ont causé d'importants dégâts structurels. Ces événements soulignent la nécessité d'analyser les interactions dynamiques entre les ondes sismiques, les cavités salines et les infrastructures de puits.

Des méthodologies existantes, notamment celles basées sur des solutions semi-analytiques (Kurosé, 2023), permettent d'explorer la diffraction des ondes, les spectres de réponse dynamique et les impacts mécaniques dans des roches hôtes élastiques et anisotropes. En adaptant et en étendant ces approches à des milieux viscoplastiques tels que le sel, le sujet de thèse vise à établir un cadre scientifique robuste pour évaluer l'intégrité mécanique des cavités salines et des puits dans le cas de sollicitations sismiques extrêmes.

OBJECTIFS DE LA THÈSE

Cette thèse vise à enrichir la compréhension scientifique des mécanismes liés aux sollicitations sismiques sur les systèmes de stockage souterrain d'hydrogène. Cet enrichissement s'appuiera notamment sur des analyses et développements s'inscrivant dans les domaines de la géophysique et de la géomécanique.

Les travaux à mener couvriront notamment les étapes et aspects suivants :

- Analyses qualitatives et quantitatives des données sismiques historiques de la région de Manosque et éventuellement d'autres sites pertinents. Ces analyses serviront à définir des scénarios sismiques représentatifs, qui seront utilisés dans les simulations numériques.
- Modélisation numérique avancée. Il s'agira de développer des modèles numériques tridimensionnels pour simuler la propagation, la diffraction et l'interaction des ondes sismiques avec les cavités salines (vides, sous pressions, etc.). Ces modèles intégreront des modèles de comportement relativement élaborés, tels que des modèles viscoplastiques et endommageables, afin de mieux représenter le comportement mécanique du sel sous conditions dynamiques.
- Analyse de l'endommagement et de la fracturation en quasi-statique mais sous l'effet des sollicitations identifiées par l'analyse dynamique. Cette analyse inclura à la fois des modèles continus se basant sur le post-traitement des contraintes et des modèles introduisant les fractures de manière explicite.
- Analyse de la réponse dynamique. Il s'agira d'étudier le comportement de l'ouvrage en analysant la distribution et évolution temporelle du champ de contraintes, les points singuliers où la concentration des contraintes se développe, les champs de déformation, les mécanismes d'endommagement et de rupture des cavités salines et des puits soumis à un chargement sismique. Cette analyse s'appuiera sur des spectres de réponse caractérisés précédemment pour quantifier les effets dynamiques et identifier les

conditions de chargement critiques. Différents niveaux de remplissage en hydrogène seront considérés pour estimer les spectres de réponses des cavités et leurs effets seront examinés afin de déterminer les cas les plus critiques.

- Détermination des caractéristiques (grandeurs) physiques et géométriques pertinentes dans le cadre d'une telle sollicitation.
- Extension de l'approche de modélisation établie pour le site de Manosque à d'autres sites européens représentatifs de contextes géologiques et sismiques variés. L'applicabilité des méthodologies ainsi développées à différents systèmes de stockage et scénarios opérationnels sera évaluée.
- Élaboration d'un cadre d'évaluation probabiliste des risques afin de quantifier la probabilité et les conséquences d'une défaillance structurelle sous chargement sismique. Des recommandations seront formulées pour optimiser la conception, la sécurité opérationnelle et les protocoles de surveillance.

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Les travaux de thèse se dérouleront selon les quatre phases successives décrites ci-après.

Phase 1 : Analyse de l'aléa sismique

Cette première phase consistera à caractériser l'environnement sismique de la région de Manosque et d'autres sites sélectionnés. Les archives historiques seront analysées parallèlement à des scénarios sismiques afin de définir des paramètres clés, notamment l'amplitude des ondes, leur contenu fréquentiel et leurs propriétés d'atténuation. Cette phase intégrera également des données géologiques spécifiques aux sites étudiés afin de prendre en compte les variations des conditions du sous-sol.

Phase 2 : Modélisation de la propagation des ondes (en milieux homogènes et hétérogènes, cavité vide ou sous pression)

En s'appuyant sur des travaux existants, cette phase développera des modèles numériques pour simuler la propagation et la diffraction des ondes autour des cavités salines. Ces modèles incluront des comportements à la fois élastiques et viscoplastiques, permettant de capturer les effets des ondes sismiques sur les parois des cavités et leurs structures internes. L'influence du type d'onde (P, SH, SV) et de l'angle d'incidence sera étudiée de manière systématique afin d'identifier les configurations de sollicitations les plus critiques.

Phase 3 : Analyse des réponses dynamiques et des mécanismes de rupture

En utilisant des méthodes basées sur des spectres de réponse (préalablement identifiés et caractérisés), cette phase évaluera la réponse mécanique des cavités salines et des puits sous sollicitation dynamique afin de construire des méthodes d'analyse de l'endommagement et de la rupture. Les facteurs de concentration des contraintes et les amplitudes de déformation seront calculés pour évaluer la stabilité des éléments structurels critiques. Des modèles couplés hydromécaniques avec la présence éventuelle des fractures seront intégrés afin de prendre en compte les interactions fluide-structure, en particulier dans des conditions saturées en hydrogène.

Phase 4 : Application aux sites européens et évaluation des risques

Cette phase appliquera les méthodologies développées à celui de la région de Manosque et d'autres sites sélectionnés., en adaptant les modèles à différents contextes géologiques afin de proposer un cadre général d'analyse des risques. Enfin, une approche d'évaluation probabiliste des risques intégrera les données d'aléa sismique avec les résultats de simulations numériques pour apprécier les probabilités de rupture. Cette phase aboutira à la formulation de recommandations pour la maîtrise du risque sismique vis-à-vis des ouvrages souterrains de stockage d'hydrogène.

Le déroulement de la thèse s'effectuera selon le calendrier prévisionnel suivant :

- Année 1 : Analyse bibliographique, caractérisation/définition de l'aléa sismique, prise en main des différents outils de modélisations et développement des premiers modèles numériques.
- Année 2 : Simulations avec des modèles plus élaborés/enrichis, analyse de la réponse dynamique et analyse de sensibilité.
- Année 3 : Généralisation des résultats, mise à jour de la méthodologie d'évaluation des risques et diffusion des résultats via des publications et rédaction de la thèse.

PROFIL

Bac +5 – Cette offre de thèse s'adresse aux diplômés d'un Master recherche en Géomécanique

Solide formation en géomécanique, géophysique et physique des roches

Fortes compétences en modélisation numérique et programmation (Fortran, Python, VB.net ou Javascript) et intérêt pour le développement de solutions analytiques

Motivation et capacité à travailler en équipe

RÉFÉRENCES

- Kurose, A. (2000) Effets des séismes sur les ouvrages souterrains. PhD Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, 248 p.
- Kurose, A. & Bérest, P (2000). A Concept for Earthquake-Resistant Design of Underground Structures: Stress Response Spectrum. 4th North American Rock Mechanics Symposium, 2000, Seattle, United States. pp.1043-1049, <https://hal.science/hal-00116132v1>.
- Lu, L., Shi, Y., Wang, M., Ye, M., Zuo, C., & Shun X. (2025) Seismic performance of salt cavern gas storage subjected to moderate earthquake loads in compressed CO2 energy storage scenarios. Energy Reports, vol13, June, Pages 2366-2383, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.01.043>
- Djizanne H., Zapf D., Habbani H., Körner F. & Brouard B. (2025) Advanced constitutive models for dimensioning salt caverns in Underground Hydrogen Storage. 11th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech XI), July 8-10, 2025, in Santa Fe, New Mexico, USA
- Pouya A. & Bemani Yazdi P., A damage-plasticity model for cohesive fractures (2015) Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences 73(2015)194-202.
- Zhu Cheng, Pouya A. & Arson C., (2015) Micro-Macro Analysis and Phenomenological Modelling of Salt, Viscous Damage and Application to Salt Caverns. Rock Mech Rock Eng (2015) 48:2567-2580.

INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES

Lieu de la thèse : Verneuil-en-Halatte

Les déplacements dans le cadre de la thèse seront fréquents : France (Ineris Nancy et autres partenaires du projet FrHyGe) et à l'étranger (congrès ciblés).

Encadrement :

Directeur de these : Amade POUYA (Université Gustave Eiffel, UGE, Ecole des Ponts)

Hippolyte DJIZANNE (Ineris)

Benoît BROUARD (Brouard Consulting)

Salaire : 2 105€ brut par mois

18 RTT en plus des 31 CP annuels

Horaires variables

Restaurant d'entreprise (ou titres restaurants pour les sites hors Verneuil)

Bornes de recharge électriques

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