

THESES ANDRA APPELS A PROJETS 2022

----- THEMES PROPOSES

Préambule

Des travaux de R&D sont conduits tout au long de la vie des stockages de déchets radioactifs, depuis leur conception jusqu'à leur exploitation et leur fermeture, en regard des besoins afférents. Le caractère progressif du développement des stockages sur plusieurs dizaines d'années, voire le siècle pour le projet Cigéo (Centre industriel de stockage géologique de déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue), permet ainsi, en continu, leur optimisation et l'intégration des progrès de connaissances.

Pour conduire ses travaux de recherche, l'Andra s'appuie depuis 30 ans, sur le tissu national et international des acteurs de la recherche et développement et de l'innovation. L'Andra s'est également dotée, depuis plusieurs années, d'outils de recherche en propre : (i) le Laboratoire de recherche souterrain et l'Observatoire pérenne de l'environnement, en Meuse/Haute-Marne, spécifiquement pour le projet Cigéo, et (ii) des moyens de simulation numérique pour l'ensemble des activités de l'Agence. Enfin, l'Andra soutient la formation par la recherche au travers d'un appel à projets de thèses.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce nouvel appel à projets de thèses Andra 2022, qui vise à couvrir un ensemble de thématiques diverses avec des enjeux opérationnels à court et moyen termes. Ces thématiques concernent majoritairement le projet Cigéo, mais certaines sont aussi pertinentes pour les centres de surface.

Il s'agit pour l'essentiel de traiter de problématiques complexes, notamment les multi-couplages au sens large, afin de mieux quantifier les marges de conception et de sûreté par rapport aux choix retenus pour le dossier de Demande d'autorisation de création de Cigéo. Les thèmes proposés visent notamment à s'approcher au plus près de la réalité du fonctionnement des stockages pour optimiser précisément les marges de conception et de sûreté et ouvrir le champ d'optimisations futures dans la conception.

Les enjeux ou verrous scientifiques afférents sont importants. Les sujets proposés font ainsi appel à de solides connaissances scientifiques ou technologiques et à des qualités multiples notamment la multidisciplinarité, l'analyse et la capacité cognitive, agrégeant souvent expérimentation, modélisation et simulation numérique. Ils offrent un terrain d'expression de l'excellence scientifique des laboratoires et des doctorants.

Comportement thermo-hydro-mécanique de la formation du Callovo-Oxfordien

1. Représentation micro-macro de la surpression interstitielle naturelle dans le Callovo-Oxfordien

La formation argileuse du Callovo-Oxfordien présente naturellement un excès de pression d'eau interstitielle de quelques dixièmes de MPa par rapport à celle attendue théoriquement. Ce type d'anomalie de pression, également décrites dans d'autres formations argileuses peu perméables, peut avoir plusieurs origines possibles comme le montrent les travaux conduits à travers le monde sur les formations argileuses : phénomènes de transfert couplés, processus hydro-chemio-mécaniques, transitoire hydraulique... Pour le Callovo-Oxfordien, l'analyse exhaustive des causes

possibles de la suppression ne permet toutefois pas de conclure à une origine émanant d'un phénomène unitaire, ainsi il est fortement probable que la surpression d'eau interstitielle dans le Callovo-Oxfordien soit la combinaison de plusieurs phénomènes.

Une meilleure évaluation de l'origine de la suppression interstitielle dans le Callovo-Oxfordien est aujourd'hui recherchée dans l'objectif d'améliorer la représentation des flux d'eau et de solutés et ainsi réduire les marges conservatoires prises en compte dans la conception et les évaluations de sûreté en après-fermeture.

Dans ce but, la thèse visera à améliorer l'évaluation et la compréhension des couplages hydro-chimio-mécaniques se développant à l'échelle des pores et du réseau de pores et la conséquence de ces processus à l'échelle de la formation. Pour cela il sera envisagé de mener des travaux expérimentaux permettant de mieux caractériser les couplages hydro-chimio-mécaniques aux différentes échelles dans les argilites du Callovo-Oxfordien et de développer des approches de modélisation micro-macro permettant de prendre en compte conjointement ces différents phénomènes influant sur la surpression dans le Callovo-Oxfordien et leurs influences réciproques. L'un des attendus principaux de ce sujet sera de réévaluer au travers des approches développées et des données existantes les suppressions mesurées *in-situ*.

2. Améliorer la représentation des mécanismes à l'origine de l'état de contrainte mécanique anisotrope actuel sur le site d'implantation du projet Cigéo

Les travaux menés depuis plus de 15 ans par l'Andra à l'échelle du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et à l'échelle de la zone de transposition du centre de stockage Cigéo permettent d'établir un état des contraintes mécaniques naturelles *in situ* anisotrope dans le Callovo-Oxfordien, caractérisé par une contrainte principale horizontale majeure, une contrainte principale intermédiaire verticale et une contrainte principale horizontale mineure. La contrainte horizontale mineure est maximale dans l'unité argileuse et localement, la contrainte verticale peut devenir la contrainte principale mineure. Le ratio entre la contrainte principale horizontale majeure et la contrainte principale horizontale mineure (σ_H/σ_h) est de l'ordre de 1,3 au maximum.

Pour optimiser la conception du centre de stockage Cigéo, qui prend en compte de manière prudente (enveloppe) l'état des contraintes *in situ* anisotrope dans le Callovo-Oxfordien à l'Actuel, il est nécessaire de mieux représenter les mécanismes qui en sont à l'origine. Le contexte tectonique ne semble pas expliquer ce fait : le climax compressif Alpin qui a conduit à la mise en place des derniers massifs externes (Jura) s'est achevé il y a 3 millions d'années, et le fluage du Callovo-Oxfordien en grand, même faible, aurait dû permettre de dissiper le déviateur de contraintes. Les propriétés rhéologiques des formations ne permettent pas non plus d'expliquer l'amplitude de la contrainte horizontale mineure au milieu des argiles.

L'objectif de ce travail de thèse sera d'étudier différents mécanismes possibles, à différentes échelles, qui expliqueraient l'état de contrainte mécanique *in situ* dans le Callovo-Oxfordien et dans la pile sédimentaire aux différentes échelles spatiales (locales, régionales, Bassin parisien, etc.), en particulier avec les différences d'amplitude de contrainte horizontale mineure avec les encaissants calcaires.

Radionucléides – Déchets radioactifs

3. Transfert de solutés réactifs dans les milieux cimentaires et argileux partiellement saturés en eau.

Les conditions insaturées sont présentes dans de nombreuses situations de stockages. Par rapport aux conditions saturées en eau, les états insaturés limitent le transport des solutés et l'accès aux surfaces réactives ce qui conditionne l'évolution chimique des matériaux et la migration des radionucléides au cours du temps. Les phases de désaturation et/ou de resaturation impliquent de fait une évolution de ces processus au cours du temps.

Cette thèse visera à améliorer la représentation des phénomènes de transport réactif en conditions insaturées, notamment pour les systèmes complexes où les eaux de resaturation d'un matériau cimentaire ou argileux sont en déséquilibre chimique. L'objectif de la thèse portera sur le développement à l'échelle macroscopique de lois de comportement régissant le transport réactif au sein des systèmes argileux ou cimentaires insaturés. Il est attendu notamment de développer des essais expérimentaux et une modélisation en transport réactif permettant l'établissement des lois de corrections des paramètres de transports (coefficient de diffusion, rétention). Les développements de ces lois de comportement pourront s'appuyer sur une description expérimentale et/ou numérique des processus chimio-hydro-mécaniques aux petites échelles (interfaces, pores et réseau de pores).

Matériaux et composants ouvrages des stockages

4. Evolution de composites à matrice céramique en situation de stockage géologique

Les Composites à Matrice Céramique (CMC) allient la résistance thermique et la stabilité chimique des céramiques et ont un comportement mécanique tenace du fait de leur structure composite (incorporation de renforts). Développés pour des applications techniques à haute température dont l'aéronautique, ils sont aujourd'hui envisagés pour des applications plus basse température avec des temps d'exploitation plus longs via le développement de matériaux CMC moins chers. Dans ce cadre, l'Andra étudie à titre prospectif la possibilité d'utiliser des composites oxydes/oxydes pour l'application au chemisage des alvéoles de stockage de déchets HA. Différents couples matériaux sont aujourd'hui envisagés (matrices oxydes ou géopolymères, fibres oxydes).

Pour déterminer leurs propriétés en situations de stockage, la thèse visera à acquérir les mécanismes de vieillissement des microstructures (caractérisation des matrices, fibres et interfaces sous lixiviation) et l'évolution des propriétés mécaniques en conditions de stockage (eau représentative de l'environnement du stockage, température, rayonnement). Les données acquises pourront alimenter par la suite les modèles d'endommagement les plus pertinents pour évaluer le comportement à long terme du chemisage. Ils pourront également permettre d'avancer sur les choix définitifs des couples matrice/fibres les plus pertinents pour l'application envisagée.

5. Caractérisation et modélisation du comportement hydromécanique-gaz des matériaux argileux pour les ouvrages de fermeture du centre de stockage Cigéo

En après-fermeture, la représentation plus fine du transitoire hydraulique-gaz constitue un enjeu de quantification des marges de conception et de sûreté, d'optimisation de la conception des ouvrages de fermeture et de description fine de leurs performances à long terme. Les simulations du comportement hydromécanique-gaz des ouvrages de fermeture s'appuient sur des modèles complexes pour représenter l'évolution des différents matériaux qui les constituent. La démarche de l'Andra est d'aller vers l'amélioration de ces modèles pour simuler les ouvrages de fermeture en situation de stockage en considérant les processus physiques concernés (comportement hydromécanique, transfert de gaz, chimie), en intégrant progressivement les couplages entre ces processus et en accroissant la représentation de la complexité de la géométrie des ouvrages.

Les modèles les plus performants pour représenter le comportement hydromécanique des argiles gonflantes reposent sur une représentation fine des processus aux échelles micro/macro et des couplages entre ces échelles. L'acquisition de données pour alimenter ces modèles nécessite des essais innovants notamment pour caractériser l'évolution de la porosité en fonction de l'hydratation, des sollicitations mécaniques ou gaz. De plus, le frottement aux interfaces entre les matériaux au sein des ouvrages de fermeture a été identifié comme ayant un rôle important dans le développement de la pression de gonflement et l'état d'équilibre hydromécanique atteint après saturation. L'optimisation des ouvrages de fermeture implique une meilleure représentation des effets d'échelle sur ce processus, de l'influence de la nature des interfaces et des données à utiliser pour les modélisations. L'Andra souhaite également étendre sa base de connaissance sur les mélanges bentonite/sable ou argilite/sable avec une teneur en sable supérieure à 50% et pour différents types d'assemblages (blocs compactés/pellets).

Le travail de thèse portera sur le développement et la mise en œuvre de techniques expérimentales afin d'acquérir des paramètres pertinents pour les modèles à double structure porale et des données complémentaires sur les matériaux argileux pour améliorer la représentation en grand des ouvrages de fermeture. En particulier, un focus sera fait sur le rôle et la représentation des frottements aux interfaces et sur les sollicitations au gaz pour ces ouvrages.

Observation-surveillance : dispositifs techniques

6. Développement de méthodes d'analyse des données de mesures par fibre optique pour la détermination des déformations et d'endommagement d'ouvrages souterrains en béton

La fibre optique est un moyen de plus en plus utilisé en génie civil pour le suivi thermomécanique des ouvrages ainsi que pour la détection d'endommagement potentiel. L'Andra envisage d'utiliser la technologie par capteur à fibre optique répartie par Brillouin/Rayleigh pour la surveillance de ses ouvrages souterrains en béton. Dans le cadre de son programme de développement des capteurs à fibre optique, la conversion des signaux bruts des capteurs fibre optique en grandeurs facilement exploitables a déjà été initiée autour de certains types d'ouvrages, par exemple pour déterminer et visualiser la convergence d'un tube en acier (A. Piccolo, 2020). Les algorithmes et l'approche méthodologique développés ont permis de faciliter l'interprétation des phénomènes observés.

Pour mieux comprendre le comportement des ouvrages en béton instrumentés par capteur à fibre optique répartie, il est nécessaire de poursuivre des travaux autour du traitement des données de fibre optique appliqué aux ouvrages en béton (convergence du tunnel prenant en compte les données matériaux, les capteurs installés en redondance). Il est également nécessaire d'injecter des algorithmes de corrections et d'ajustement pour prendre en compte les caractéristiques du béton au jeune âge et l'influence du retrait/fluage à long terme.

L'objectif du travail de thèse sera de généraliser la méthodologie de traitement des données fibres optiques pour permettre de définir des indicateurs de performances des structures en béton des ouvrages souterrains. Les composantes mécaniques liées au retrait/fluage devront être prises en compte. A cet effet, des essais en laboratoire pourront être envisagés sur des corps d'épreuve représentatifs. La méthodologie pourra s'appuyer sur les travaux de l'Andra déjà réalisés notamment sur les ouvrages en acier, sur les données issues des capteurs installés au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ainsi que sur l'état de l'art dans le domaine et sur des approches nouvelles d'algorithmes de traitement des données.

Simulation numérique, BIM, IA pour le traitement des données

7. Analyse de sensibilité locale appliquée à la simulation numérique de problèmes physiques et / ou chimiques fortement couplés

L'évaluation des écoulements d'eau et de gaz en après-fermeture dans les stockages fait l'objet d'études de sensibilité multiparamétriques multi-échelle (des alvéoles de stockage au stockage en grand avec le milieu géologique environnant) à l'aide d'outil probabiliste. Elles prennent notamment en compte les variabilités et les incertitudes des paramètres des modèles de génération de gaz et d'écoulement eau et gaz. Elles conduisent à définir des domaines de sensibilité d'indicateurs des écoulements et permettent ainsi de hiérarchiser le poids des incertitudes sur les paramètres. Cette approche est globale et présente des limites de précision pour des domaines de jeu de valeurs de paramètres de petite taille.

Le travail de thèse portera sur l'analyse, la sélection et le développement de sensibilité locale de type intrusives, plus particulièrement des méthodes de différentiation automatique (de type état adjoint) portant sur la simulation numérique d'écoulement d'eau et de gaz en milieu poreux, permettant de hiérarchiser localement, sur des jeux de données déterministes, le poids des paramètres influents.

8. Interpolations spatio-temporelles (4D) basées sur des Graph Neural Network Dynamiques (GNN-D) et applications au stockage géologique de déchets radioactifs

La surveillance de l'évolution phénoménologique du centre de stockage Cigéo reposera notamment sur la comparaison entre des données acquises par des capteurs et des données issues de modèles prédictifs (simulation, assimilation de données). Dans ce contexte, la prévision de séries temporelles et l'interpolation spatio-temporelle (4D) en conditions dynamiques (c.-à-d. quand la structure même du réseau de capteurs évolue dans le temps : pertes de capteurs liées au vieillissement, dérives, remplacements, ajouts, etc...) sont deux tâches essentielles au traitement de données.

Alors que les récents progrès de la recherche en Deep Learning se sont d'abord attachés à la prévision de séries temporelles (Salinas et al. 2019 ; Sen, Yu et Dhillon 2019), peu d'attention a été accordée jusqu'alors à l'interpolation 4D dynamique. Pour résoudre des problèmes généraux d'interpolation, une approche bien développée est la régression du processus gaussien (GP) (Cressie et Wikle 2015). Celle-ci présente néanmoins deux limitations : (1) le modèle est coûteux en calcul et (2) il est difficile de modéliser des structures en réseau. Pour dépasser ces 2 limitations, la complétion matricielle/tenseur (CMT) régularisée apparaît comme une solution efficace (Deng et al. 2016 ; Takeuchi et al. 2017). Combinant une hypothèse de faible rang et des régularisations spatio-temporelles, ces modèles peuvent décrire simultanément à la fois la cohérence globale et la cohérence locale des données. Cependant, la CMT présente un point faible : pour des nouveaux capteurs introduits (ou retirés) dans la structure, il n'est plus possible d'appliquer directement le modèle préalablement entraîné ; au lieu de cela, le modèle complet doit être ré-entraîné vis-à-vis de la nouvelle structure. Plus récemment, le potentiel de la modélisation de données 4D à l'aide de GNN a été étudié, notamment par Xu et al. 2018 puis par Wu et al. 2021 (IGNNK : Inductive Graph Neural Networks for Spatiotemporal Kriging) pour résoudre des problèmes d'interpolation 4D, en temps réel, et sur des structures dynamiques.

En s'appuyant sur i) les travaux de recherche précédemment cités, ii) sur des données réelles acquises dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (expérimentation ALC1605) ainsi que sur iii) la simulation numérique physique, le travail de thèse portera sur la reconstruction de champs spatio-temporels 4D à partir de données de mesure très ponctuelles et dont la structure évolue dans le temps.

Environnement

9. Caractérisation des services écosystémiques rendus par la biodiversité des cours d'eau intermittents

Le projet Cigéo s'inscrit dans un environnement karstique en tête de trois bassins versants qui alimentent des cours d'eau permanents ou intermittents. Ces milieux humides, supports de nombreux services écosystémiques, constituent les habitats d'une biodiversité spécifique, dont la contribution aux services rendus reste peu identifiée et dont la préservation a été assurée par la mise en œuvre de la méthode « Eviter-Réduire-Compenser ». Sur le long terme et dans le cadre de changements climatiques futurs, le régime hydrique de ces cours d'eau pourra évoluer vers une augmentation ou une réduction des périodes d'assecs susceptibles d'impacter la biodiversité et les services rendus par ces milieux. Cette thèse s'attachera à identifier les fonctions écologiques supportées par la biodiversité spécifique à ces milieux humides en lien avec la fourniture de certains services écosystémiques, dans le contexte de changement de régime hydrique des cours d'eau.

Pour cela, le travail de recherche consistera à décrire, par une analyse bibliographique et par des observations de terrain, les liens entre les fonctions traditionnellement associées aux zones humides (cf. référentiel du tronç commun national & Méthode Nationale d'Évaluation des Fonctions des Zones Humides), les fonctions spécifiques à certains groupes taxonomiques (animaux, végétaux et/ou microbiens) inféodés aux cours d'eau intermittents, et les services écosystémiques rendus. Puis, ces connaissances seront utilisées pour proposer une analyse des effets des changements de régimes hydriques, en lien avec le changement climatique et/ou l'implantation du projet Cigéo, sur les services écosystémiques.

10. Développement d'indicateurs de suivi de la représentation sociale des paysages sur le temps long

Dans le cadre du projet Cigéo, la mise en œuvre de la méthode « Eviter-Réduire-Compenser » a conduit à minimiser l'impact du développement des installations de surface d'un centre de stockage de déchets radioactifs sur les paysages ruraux du territoire d'implantation. Cependant, la représentation et la perception d'un paysage contribuent au sentiment d'appartenance/d'ancrage à un territoire par les populations résidentes, elles peuvent impacter la valeur attribuée au paysage en tant que patrimoine culturel.

Dans le cadre de l'évaluation des services écosystémiques culturels rendus par le territoire, l'analyse de la perception et de la représentation des paysages par les populations constitue donc un élément clef permettant d'évaluer les impacts de l'implantation du site Cigéo sur le patrimoine paysager. La problématique de ce travail se situe donc ici à l'interface entre les individus et le paysage physique dans la relation qui les lie.

Le travail de recherche consistera en l'élaboration d'indicateur(s) permettant à la fois de caractériser ce que représente aujourd'hui le paysage pour les riverains mais aussi de donner une valeur au paysage lui-même. Le travail cherchera à développer des indicateurs reproductibles dans le temps, en particulier sur le temps long de façon à permettre des comparaisons sur la durée de vie de Cigéo.