

APPEL A PROJETS DE THESES ANDRA 2020

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 plus de 25 ans, sur le tissu national et international des acteurs de la recherche et développement et innovation. L'Andra s'est également dotée, depuis plusieurs années, d'outils de recherche en propre : (i) le Laboratoire Souterrain de recherche 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.

Les connaissances scientifiques et technologiques acquises par l'Andra pendant toutes ces années répondent ainsi aux besoins successifs de la conception, de l'exploitation, de l'évaluation de sûreté et de la surveillance des stockages de déchets radioactifs, pour les centres existants (Centre de stockage de la Manche et centres de stockage de l'Aube pour les déchets de faible et moyenne activité à vie courte et les déchets de très faible activité), comme pour les projets de stockage (Cigéo pour les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue, et projet de stockage à faible profondeur pour les déchets de faible et moyenne activité à vie longue).

La poursuite de l'effort de l'Andra en matière de recherche et innovation, s'inscrit dans une logique de consolidation des connaissances, de précision, d'optimisation, de prospective et d'innovation ; C'est aussi un moyen garantissant un haut niveau de connaissances et de rigueur scientifiques, en regard de l'exigence d'excellence scientifique de l'Agence pour répondre à ses activités, et vis-à-vis du dialogue avec les parties prenantes. Par ailleurs, en tant qu'établissement public et en charge d'une mission d'intérêt général, l'Andra contribue ainsi à la formation par la recherche en France. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce nouvel appel à projets de thèses Andra 2020.

Géologie

1. Modélisation du comportement de failles vis-à-vis de facteurs environnementaux

L'impact des facteurs environnementaux sur les estimations de l'aléa sismique et en particulier sur le comportement des failles préexistantes est un sujet au cœur de l'évaluation long-terme de l'aléa sismique à prendre en compte pour l'étude du stockage géologique des déchets radioactifs (projet Cigéo). De nombreuses études ont été menées qui ont permis de cartographier et caractériser les failles dans un rayon de 50 km autour du site d'implantation de Cigéo. Bien que ce site soit situé dans une région où la sismicité est très faible et dépourvue de traces d'activité Plio-Quaternaire et que la conception de Cigéo prend en compte l'aléa sismique de manière très enveloppe, il convient de questionner la possibilité que des facteurs environnementaux puissent perturber localement le champ de contraintes et favoriser l'activation d'une faille et générer des séismes. Plusieurs mécanismes de temporalité différente (érosion fluviale liée à des crues, chargements et déchargements de la croûte liés à la formation et fonte d'une calotte glaciaire) ont été proposés pour expliquer l'occurrence de séismes de fortes magnitudes dans des zones stables tels que les séismes de New Madrid de 1811-1812 qui ont affecté les états de l'Arkansas, Missouri et Tennessee (USA) ou les paléo-séismes qui se sont produits dans le bouclier Fennoscandien.

Le travail de thèse visera à modéliser le comportement des failles de Vittel, Poisson, Marnes et du fossé de Gondrecourt vis-à-vis de facteurs environnementaux (glaciation, érosion, etc.) et à apprécier le potentiel de ces failles à générer des séismes et des déplacements, résultant le cas échéant en des ruptures secondaires sur des structures non cartographiées.

2. Modélisation macroscopique des conditions de fracturation d'une roche argileuse par sollicitation au gaz

L'Andra a établi un socle de connaissances expérimentales sur la fracturation au gaz de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien, roche hôte du projet de stockage profond Cigéo en Meuse/Haute-Marne. Ces connaissances ont été établies à partir d'essais sur échantillons de roche prélevés et in situ dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Elles sont cohérentes avec les données de la littérature pour d'autres roches argileuses, et sont intégrées dans les travaux de conception et de sûreté. L'accroissement des capacités des machines de simulation numérique permet d'envisager désormais une modélisation puis la simulation macroscopique du processus d'initiation et de propagation à l'échelle de la formation du Callovo-Oxfordien.

L'objectif de la thèse sera de développer, en s'appuyant sur les données expérimentales, un modèle représentatif des mécanismes d'initiation et de propagation de l'endommagement induit par une sollicitation au gaz, à l'échelle macroscopique. Ce modèle sera implémenté dans un outil de calcul numérique, avec les méthodes adéquates (en termes de temps calcul et de précision), afin de simuler les essais in situ existants et de tester les différentes conditions d'initiation et de propagation d'une fracturation au gaz à l'échelle de la formation du Callovo-Oxfordien.

3. Modélisation macroscopique des conditions de fracturation d'une roche argileuse sous sollicitation interne (thermo)hydraulique et hydromécanique

L'Andra a établi un socle de connaissances expérimentales sur la fracturation hydraulique de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien, roche hôte du projet de stockage profond Cigéo en Meuse/Haute-Marne, face à une sollicitation hydraulique ou thermique (augmentation de la pression interstitielle). Ces connaissances ont été établies à partir d'essais sur échantillons de roche prélevés et in situ dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Elles sont cohérentes avec les données de la littérature pour d'autres roches argileuses, et sont intégrées dans les travaux de conception et de sûreté.

Le travail de thèse portera sur la modélisation des processus physiques du couplage thermo-hydro-mécanique du Callovo-Oxfordien, combinant ou non (i) un modèle d'endommagement, (ii) des éléments joints et les méthodes des fissures non-maillées (XFEM, phase field, etc.). Les différents mécanismes physiques régissant l'initiation et la propagation des fractures, l'évolution des propriétés THM (perméabilité, conductivité, rigidité, etc.) en lien avec l'endommagement, la fissuration et/ou éventuellement la compaction thermique, seront étudiés. On cherchera à établir sous quelles conditions les fractures existantes peuvent se propager ou s'initier par pressurisation thermique. Le travail de thèse s'appuiera sur l'essai in situ CRQ de chargement thermo-hydromécanique du Callovo-Oxfordien mené dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, à des fins de validation.

4. Modélisation des processus de couplage (thermo)hydromécanique aux très petites échelles dans les roches argileuses

Le comportement macroscopique couplé (thermo)hydromécanique des roches argileuses (gonflement, contrainte effective, surpression interstitielle, endommagement...) trouve son origine aux échelles (pluri)nanométrique des pores et micrométrique des phases solides. L'Andra dispose déjà d'un socle de connaissances important sur le comportement hydromécanique macroscopique de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien, roche hôte du projet de stockage profond Cigéo en Meuse/Haute-Marne ; il permet de mener de manière robuste les travaux de conception et de sûreté, notamment par des approches enveloppes.

Au travers d'outils numériques aux petites échelles, par exemple de type dynamique moléculaire, le sujet de thèse proposera d'étudier la réponse hydromécanique à l'échelle (pluri)nanométrique d'un système argileux (ensembles structurés de particules argileuses représentatifs de ceux des argilites du Callovo-Oxfordien) sous sollicitations couplées hydrauliques, mécaniques et/ou thermiques. L'objectif est de consolider les observations faites à l'échelle macroscopique et in fine

d'évaluer plus finement les marges en termes de modèle de comportement hydromécanique macroscopique appliqué à la conception et la sûreté.

5. Analyse des transferts d'eau versus déformation du squelette solide à petite échelle dans les matériaux argileux remaniés, par mesures tomographiques combinées rayons X et neutrons

Les techniques d'imagerie comme les scanners à rayons X se sont fortement développées ces dernières années et ont permis d'une part, de mieux comprendre la microstructure des matériaux et, d'autre part, d'analyser sous certaines conditions les champs de déformation. L'amélioration de ces techniques a permis une meilleure compréhension du comportement des milieux argileux grâce à une analyse des mécanismes à petite échelle, mais ces techniques ne permettent pas de voir l'eau porale. La tomographie neutrons permet de mesurer et quantifier très finement la présence d'eau dans le matériau. La combinaison de la tomographie neutrons avec un scanner à rayons X permet de faire les deux types d'imagerie en même temps sur le même échantillon, les deux systèmes étant sensibles à différents facteurs physiques. Elle pourrait permettre de mieux identifier les liens entre l'évolution de la microstructure, les déformations, l'évolution du degré de saturation lors de l'hydratation.

Le travail de thèse portera sur le développement d'une technique d'analyse des transferts d'eau et des champs de déformation par combinaison de mesures tomographiques combinées à rayons X et neutrons applicable aux matériaux remaniés à base d'argilites de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien, roche hôte du projet de stockage profond Cigéo en Meuse/Haute-Marne. Il est attendu de cette technique qu'elle puisse faire le lien entre la(es) technique(s) de mise en forme et de mise en place et les caractéristiques hydrauliques et hydromécaniques du matériau remanié en place.

Radionucléides, Déchets

6. Transfert convectif des radionucléides et des solutés dans les matériaux cimentaires sains et endommagés

Dans le contexte des stockages, les matériaux cimentaires sont le siège de déplacement de fluides et de transferts associés des radionucléides et, plus globalement, des solutés. Le couplage entre la mobilité de l'eau et celle des solutés évoluera à mesure que les matériaux cimentaires se dégraderont avec le temps sous l'effet de sollicitations chimiques et/ou mécaniques. A ce stade, l'Andra ne retient de manière enveloppe et robuste que les propriétés chimiques dans le cadre des évaluations de sûreté, plus particulièrement en après fermeture, pour les composants cimentaires concernés.

Cette thèse aura pour objectif d'évaluer les transferts convectifs (sous gradient hydraulique), de solutés inter-agissants et non-inter-agissants pour des matériaux cimentaires sains, altérés et mécaniquement endommagés (fissurés). Il s'agira en particulier d'évaluer les grandeurs caractéristiques du transfert convectif et réactif (porosités cinématiques, propriétés de rétention...) pour différents états d'endommagement (chimique et mécanique) des matériaux cimentaires et ainsi quantifier leurs capacités à limiter les flux de solutés et radionucléides à mesure qu'ils sont endommagés. Ce projet s'appuiera, sur le plan expérimental, sur des essais de percolation et des caractérisations microstructurales et, sur le plan de la modélisation, sur des approches de modélisation en transfert réactif.

Matériaux du stockage

7. Bétons renforcés avec des fibres non-métalliques

L'emploi des fibres en substitution des armatures est une solution qui, dans les dernières décennies, s'est montrée une alternative intéressante pour certains éléments de structure en génie civil classique. Les récentes avancées ont permis d'obtenir des bétons fibrés de plus en plus performants, jusqu'à des matériaux de très hautes performances, permettant la réalisation de structures plus fines avec les mêmes propriétés mécaniques que des bétons armés. Ainsi, des fibres en aciers inoxydables sont utilisées pour améliorer la résistance à la corrosion des armatures

et donc la durabilité des ouvrages de génie civil. Des fibres en polypropylène sont également mises en œuvre pour conférer des propriétés de tenue au feu. Dans le cadre de l'optimisation du projet de stockage profond Cigéo et du développement technologique des différents concepts, ces bétons fibrés avec des fibres non métalliques sont une piste d'étude pour le futur.

L'objectif de la thèse sera de développer une solution de renforcement du béton par des fibres non métalliques tout en maintenant les performances mécaniques élevées attendues pour les structures. Le travail de thèse couvrira la recherche de fibres disponibles industriellement (organiques ou inorganiques) ou innovantes (ex. carbone) en précisant, pour chaque type, les attendus et les finalités de développement/d'emploi. Pour ces fibres, la thèse portera sur l'étude (i) du comportement à la mise en œuvre : adéquation entre une formule « béton » et la stabilité à l'état frais (mélange/procédé, taux d'incorporation, ségrégation, orientation des fibres...) et (ii) du comportement mécanique du béton fibré par rapport à la nature des fibres, l'éclatement et les dosages.

Capteurs, inspection, surveillance

8. Développement de systèmes pérennes et durables de mesure en ligne du pH

La durabilité des ouvrages se caractérise par leur capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles ils ont été conçus. Parmi les phénomènes influençant leur durabilité, le pH est un paramètre important qui gouverne un certain nombre de processus de dégradation et joue un rôle dans les phénomènes aux interfaces. Il est donc nécessaire de suivre sa valeur au cours du temps, de manière à confirmer les comportements attendus en exploitation. Il existe une variété de capteurs pH. La plupart des systèmes nécessite un étalonnage régulier, parfois avant chaque mesure. Or, les contraintes d'accès inhérentes au stockage limitent le déploiement des solutions existantes pour des applications Cigéo.

Dans ce contexte, le travail de thèse portera sur le développement de techniques ou méthodes innovantes employant des électrodes dites « tout solide », où l'ensemble des électrodes dont la référence sont réalisées à partir de matériaux durables. Une attention particulière sera donnée à la miniaturisation du capteur en vue d'avoir une faible intrusivité dans les interfaces étudiées. Les travaux de recherche pourront porter par exemple sur l'élaboration et la caractérisation d'oxydes perovskites pour capteurs de pH ou sur l'utilisation de technologies à base de fibre optique utilisée comme optode pH.

Environnement

9. Evaluation des services écosystémiques rendus par un territoire rural

Le développement par l'Andra depuis 2007 d'un observatoire environnemental pluri milieux, l'Observatoire Pérenne de l'Environnement, associé au projet Cigéo en Meuse/Haute Marne d'une durée centennale, offre une opportunité de contribuer aux choix possibles d'aménagement et d'utilisation du capital naturel des zones rurales (ressources en eau, agricole, sylvicole...), dans les contextes globaux de changement climatique, d'urbanisation/industrialisation et d'évolution de la perception de l'environnement et de sa qualité.

Le travail de thèse s'attachera, au travers de l'évaluation des services écosystémiques ou bouquets de services présents sur le territoire d'implantation de Cigéo, à développer des outils d'aide à la décision quant aux choix d'aménagements de ce territoire pour répondre aux grands enjeux de demain : gestion des ressources en eau, mutation des pratiques agricoles par exemple. L'évaluation réalisée pourra également être mise en perspective par une comparaison avec d'autres territoires impactés ou non par des développements industriels.

10. Pré-conditionneurs locaux couplés avec les estimateurs d'erreur a posteriori pour la simulation des écoulements hydraulique-gaz en milieu poreux

La simulation des écoulements d'eau et de gaz en après-fermeture à l'échelle du système de stockage géologique profond (installations et milieu géologique environnant) fait appel à des modèles complexes par leur non-linéarité, et la taille et les contrastes des paramètres d'écoulement des systèmes. De telles simulations renvoient à une bonne évaluation de l'erreur entre les solutions exactes et celles approchées, et de la localisation des erreurs, en fonction du schéma numérique de résolution et de la discrétisation spatio-temporelle. Le système d'équations discrétisées des écoulements eau-gaz en milieu poreux conduit à la résolution d'un système linéaire creux, souvent difficile à conditionner. Cette résolution utilise des solveurs linéaires creux itératifs comme Bi-CGStab, GMRES ou CG préconditionnés : d'une part, le choix du pré-conditionneur est difficile à fixer a priori en fonction du problème et, d'autre part, le pré-conditionneur retenu est toujours établi de manière « globale », pour « toute la durée » de la simulation, ce qui conduit généralement à des temps de calculs longs, mais avec une précision numérique acceptable en regard des incertitudes phénoménologiques.

Le travail de thèse portera sur l'étude, le développement et le test d'une approche de résolution basée sur l'utilisation d'un choix flexible de pré-conditionneurs grâce à des estimateurs d'erreurs a posteriori. L'objectif est de minimiser à la fois le temps de chaque itération et le nombre total d'itérations nécessaires à l'estimation a posteriori et le contrôle d'erreur, donc in fine d'accroître les capacités de représentation des écoulements eau-gaz, en termes de niveau de détails de représentation des grands systèmes plus fins, de réduction de temps calcul, et de précision augmentée.

11. 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 à l'échelle du système de stockage géologique profond (installations et milieu géologique environnant) fait l'objet d'études de sensibilité multiparamétriques, qui prennent notamment en compte les variabilités naturelles et les incertitudes des paramètres du modèle diphasique d'écoulement eau/gaz pour les différents composants considérés. Cette évaluation conduit ainsi à définir des domaines de valeur d'indicateurs (degrés de saturation en eau et gaz, flux d'eau et de gaz, pressions d'eau et de gaz...) à différents endroits du stockage. Des méthodes d'analyse de sensibilité globale appliquées à ces domaines permettent ensuite de hiérarchiser le poids des paramètres influents. Ces méthodes globales ont des limites de précision pour des événements de très faible probabilité (i.e. domaine de petite taille). L'utilisation de méthodes de sensibilité locale, de type intrusives, apparaît comme une solution pour évaluer le poids des paramètres influents dans des domaines de petite taille ou représentés par un jeu de données déterministe.

Le travail de thèse portera sur l'analyse, la sélection et le développement de méthodes de différentiation automatique (de type état adjoint) portant sur des problématiques 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.

12. Optimisation du tirage statistique pour structurer le lien entre données de monitoring et données de simulation numérique prédictive

L'évaluation du comportement phénoménologique du stockage profond Cigéo en exploitation reposera notamment sur la comparaison entre des données acquises par un ensemble de dispositifs de monitoring et des données issues de modèles prédictifs. De nombreuses stratégies et méthodes existent pour ce faire. Dans ce cadre, l'accroissement des capacités des machines de simulation numérique et de stockage de données, permettent d'envisager la calibration de modèles à partir de peu de points de mesure (« sparse-data ») et la capacité de ces modèles à s'enrichir au fil du temps (« predictive-monitoring »).

En s'appuyant sur des données acquises dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, le travail de thèse portera d'une part sur la calibration de modèles (approche « model-based »). Il s'intéressera particulièrement à la reconstruction de champs à partir de données très ponctuelles (« missing data completion ») en utilisant des méthodes robustes d'interpolation et d'extrapolation 4D dans l'espace et dans le temps (e.g. krigging, low-rank tensor approximation method, Tucker decomposition) avec la difficulté du choix de la base de représentation vis-à-vis de la sparsité mais aussi de la sensibilité des paramètres du modèle et bien sûr de la nécessité de grandes extrapolations temporelles. Par ailleurs, le travail de thèse portera sur l'étude de « l'ignorance » pour reproduire et expliquer des transformations et des modifications du comportement des ouvrages qui n'auraient pas été explicitement décrites pendant la phase de calibration des modèles. Dans ce cadre, une approche « data-driven » pourra être proposée (e.g. incremental dynamic mode decomposition, sparse-PGD). Enfin, une solution « hybride » combinant les deux approches (« model-based » et « data-driven ») pourra être proposée et testée.

Knowledge Management et Mémoire

13. Transmission dans la durée des connaissances pour la gestion des déchets radioactifs

La gestion des déchets radioactifs requière de pérenniser et transmettre les connaissances au sein de chaque génération ainsi que pour les générations suivantes. La maîtrise des dynamiques entre les flux de connaissance et le stock d'information dans le temps repose sur l'organisation des cycles et des interfaces entre l'enregistrement des informations, la capitalisation des connaissances et l'élaboration de la mémoire. Face à cette problématique, il s'agit de définir les structures et les procédés du système cognitif global afin d'en dériver des principes et mécanismes compatibles avec les différentes échelles organisationnelles et temporelles de gestion des déchets radioactifs.

Le travail de thèse, fondamentalement transdisciplinaire, pourra notamment aborder : l'apprentissage collectif et la pérennisation des connaissances ; leur transmission dans la longue durée ; les modalités de la connaissance et de la mémoire ; les mécanismes organisationnels internes à un organisme et leur éventuelle spécificité pour un organisme public et les mécanismes institutionnels et organisationnels distribués au sein d'un ensemble d'organismes hétérogènes et/ou dans un territoire.

On considérera par exemple : les méthodologies de l'apprentissage organisationnel ; les modalités de la mémoire à court-terme et de la mémoire à long-terme, celles des mémoires épisodique, sémantique et procédurale ainsi que celles de l'oubli ; l'évolution des institutions, l'adaptation des organisations et l'ajustement des mécanismes de transmission des connaissances ; la résilience des systèmes sociaux.

14. Durabilité du papier et du couple papier/encre en conditions d'archivage

Actuellement, le papier est le support utilisé pour le dossier détaillé de mémoire des centres de stockage de l'Andra. Le support utilisé est un papier permanent, décrit par les normes ISO9706 et 11108. Cette solution retenue comme référence satisfait une durabilité minimale de 300 à 600 ans en fonction des centres de stockages. Les études disponibles sur le vieillissement du papier ont été réalisées sur les papiers dits « acides » et la description cinétique de la dégradation est incomplète. D'autre part, l'interaction entre le support cellulosique et les encres a été assez peu étudiée. Les formulations de l'encre industrielle évoluant très rapidement, il est souhaitable d'identifier des catégories d'encres plus stables vis-à-vis des mécanismes de dégradation.

L'objectif de la thèse sera d'acquérir des données sur la durabilité du papier permanent, de l'encre et du couple encre/papier dans les conditions de conservation actuelles de ces papiers. Il s'agira donc d'abord d'obtenir des données expérimentales sur le vieillissement du papier permanent par oxydation et par hydrolyse afin de compléter les données disponibles dans la littérature et ensuite d'établir, si possible, un modèle de prédiction de durée de vie du couple papier/encre. En ce qui concerne les encres, il s'agira d'analyser les encres disponibles commercialement et définir les composés les plus stables vis-à-vis du vieillissement.