

# THESES ANDRA APPELS A PROJETS 2021

## ----- 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 plus de 25 ans, sur le tissu national et international des acteurs d'excellence de la recherche et développement et de l'innovation, en soutenant par ailleurs la formation par la recherche au travers d'un appel à projets de thèses. L'Andra s'est également dotée, depuis plusieurs années, d'outils de recherche en propre : (i) le Laboratoire Souterrain de recherche en et l'Observatoire pérenne de l'environnement, en Meuse/Haute-Marne, spécifiquement pour le projet Cigéo, et (ii) des codes de simulation numérique pour l'ensemble des activités de l'Agence.*

*C'est dans ce contexte que s'inscrit ce nouvel appel à projets de thèses Andra 2021. Il 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 et d'ouvrir le champ d'optimisations futures dans la conception. Les thèmes proposés visent notamment à s'approcher au plus près de la réalité du fonctionnement des stockages.*

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

## Géologie – hydrogéologie – transfert de solutés en milieu naturel

### **1. Représentation, modélisation et simulation numérique des écoulements et du transport de solutés dans l'hydrosystème des Calcaires du Barrois autour du projet Cigéo**

La formation des calcaires du Barrois sur laquelle seront implantées les installations de surface du projet Cigéo (centre industriel de stockage de déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue dans une formation profonde argileuse en Meuse/Haute-Marne), si le projet est accepté, est constituée d'alternances de niveaux marno-calcaires plus ou moins karstifiés et affectés par de l'altération de surface (épikarst). Les études de conception des installations de surface prennent aujourd'hui en compte les caractéristiques hydrogéologiques spécifiques de cette formation, suivant une approche hydrogéologique classique de type milieu poreux continu équivalent, jugée enveloppe.

Le travail de thèse portera sur le développement d'un modèle de représentation explicite des écoulements au sein de la formation des Calcaires du Barrois, plus particulièrement au niveau et autour de la zone descendrière. Sur la base des développements déjà menés, et en appliquant une approche méthodologique globale des données de caractérisation géologiques, hydro-géophysiques et hydro-chimiques de l'hydrosystème des calcaires du Barrois, il s'agira de développer un schéma conceptuel de représentation hydrogéologique et hydrodynamique 3D explicite, couvrant des échelles allant du piézomètre jusqu'à celle d'un secteur d'étude de plusieurs km<sup>2</sup> puis de développer un modèle afférent à une des échelles spatiales considérées (plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres). Le travail s'appuiera notamment sur le réseau de mesure existant (environ 30 forages instrumentés, 6 stations hydrologiques, stations météorologiques...) mis en place depuis plusieurs années.

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

### **2. Modélisation et simulation numérique de la formation et du comportement hydromécanique de l'endommagement au pourtour des intersections de galeries**

La zone endommagée (e.g. fracturée) créée au pourtour immédiat des ouvrages souterrains dans le Callovo-Oxfordien lors du creusement et son comportement hydromécanique ont fait l'objet de nombreux travaux de caractérisation et de modélisation de l'échelle de l'échantillon à celle d'ouvrages. On dispose aujourd'hui d'une solide base de connaissances sur cette zone endommagée, notamment son rôle majeur dans le comportement hydromécanique des ouvrages dans le temps. Elle concerne plus particulièrement le linéaire courant des ouvrages. Par ailleurs, l'installation souterraine de Cigéo comportera de nombreux carrefours / intersections d'ouvrages. A ce stade, leur conception et leur dimensionnement ont été réalisées de manière prudente suivant une approche enveloppe, notamment en terme de modélisation de la zone endommagée locale.

Le travail de thèse portera sur la modélisation et la simulation numérique 3D du comportement hydromécanique des carrefours d'ouvrages dans le Callovo-Oxfordien, au travers de la représentation explicite de l'endommagement induit par le 1<sup>er</sup> ouvrage puis par le 2<sup>nd</sup> ouvrage creusé à la perpendiculaire. Des approches de représentation du type milieu poreux continu équivalent ou milieu discret (e.g. fracturé) pourront être retenues, avec les justifications afférentes. Les types de revêtements/soutènements envisagés et les méthodes de creusement et de mise en place, retenus au stade actuel de la conception de Cigéo ou possibles seront pris en compte, notamment en terme de comparaison des comportements des carrefours.

### **3. Caractérisation et modélisation micro/macro du comportement hydromécanique-gaz des matériaux argileux pour les ouvrages de fermeture du projet Cigéo**

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. En particulier, des modèles type BBM (Barcelona Basic Model) et son extension BExM (Barcelona Expansive Model) qui introduisent deux niveaux de structure associés aux micropores et aux macropores sont utilisés pour modéliser l'évolution de la resaturation, notamment sous sollicitation de transfert de gaz de ces matériaux argileux en regard de leur mise en forme (pellets...). Ces modèles nécessitent une bonne connaissance des interactions hydromécaniques-gaz entre la micro et la macrostructure, en particulier sous sollicitation de transfert de gaz et la définition du VER avec ses caractéristiques hydromécanique gaz pour modéliser in fine le composant ouvrage de fermeture de dimension pluri-métrique à pluri-décamétrique. L'utilisation combinée de la tomographie à rayons X et neutrons à différentes tailles d'échantillons pourra permettre à la fois d'analyser les champs de déformation et l'évolution de la distribution d'eau dans les matériaux argileux au cours de la saturation sous sollicitation de gaz.

Le travail de thèse portera sur (i) le développement d'une technique d'analyse des transferts d'eau et des champs de déformation sous sollicitation de gaz, (ii) l'acquisition des paramètres pertinents (par exemple fonctions d'interactions) pour des modèles de type BExM aux échelles spatiales pertinentes, (iii) le développement de modèle d'évolution hydromécanique-gaz des matériaux argileux aux échelles pertinentes, notamment pour un ouvrage réel.

## Radionucléides – Déchets radioactifs

### 4. Spéciation / stabilité des états d'oxydoréduction du sélénium à l'interface Callovo-Oxfordien et alvéole de stockage de déchets HA

Le sélénium (Se) peut présenter différents états d'oxydation (-II, -I, 0, +IV, et +VI). Ceux -II, -I et 0 sont couramment prédominants dans les environnements anoxiques « réducteurs » alors que les états +IV et +VI prédominent dans les environnements « oxydants ». Dans l'environnement géochimique réducteur du Callovo-Oxfordien (formation argileuse profonde retenue pour l'implantation du projet de stockage géologique profond Cigéo), le sélénium est ainsi attendu comme thermodynamiquement stable en solution sous des états d'oxydoréduction allant de 0 à -II. La solubilité du sélénium dépend de l'état d'oxydation : (a) Se(+VI) et Se(+IV) très solubles (solubilité non contrôlée par une phase minérale) ; (b) Se(0), sélénium natif extrêmement peu soluble et (c) Se(-I) et Se(-II) : peu solubles mais sensiblement plus solubles que Se(0). Le passage d'un état d'oxydation à un autre peut donc s'accompagner de changements de solubilité. Toutefois, le sélénium peut demeurer « métastable » sous un degré d'oxydation élevé +VI loin de l'équilibre thermodynamique (e.g. domaine réducteur du point de vue redox), notamment en absence de catalyse microbienne et de solides spécifiques comme certaines phases porteuses de fer et être présent sous différents états d'oxydation dans les eaux interstitielles du Callovo-Oxfordien.

Le travail de thèse portera sur le caractère métastable ou non du sélénium (VI) et de sa coexistence avec un état d'oxydo-réduction réduits (-II) dans les conditions du projet Cigéo et, à savoir entre un alvéole de stockage, en l'occurrence un alvéole de déchets de haute activité (HA - déchets vitrifiés) comportant des composants en acier, des produits de corrosion et le Callovo-Oxfordien. Il devra mettre en œuvre des essais en laboratoire jour (solubilité, spéciation, sorption-réduction...) et des modélisations en transport réactif à l'échelle d'un alvéole, en visant à une représentation aussi détaillée que possible et raisonnable du système géochimique multi-échelle et multi-composant (alvéole HA et Callovo-Oxfordien).

## Multi-couplages : Matériaux et composants des stockages

### 5. Modélisation et simulation numérique du comportement hydromécanique des ouvrages de fermeture du projet Cigéo à base d'argile, couplée à l'hydraulique (resaturation/saturation) et une perturbation alcaline

L'installation fond du projet Cigéo sera fermée et scellée après son exploitation. Les galeries seront remblayées avec des argilites du Callovo-Oxfordien excavées et des scellements à base d'argile gonflante seront disposés dans les galeries en des endroits particuliers et dans les ouvrages d'accès (puits et descendrie). L'évolution des scellements et les galeries remblayées en après-fermeture sera caractérisée par une resaturation couplée à une perturbation alcaline qui perdurera après l'atteinte de la saturation complète. La conception et le dimensionnement de ces ouvrages de fermeture prend en compte ces processus, notamment de manière enveloppe prudente sur la base de modélisations et simulations numériques simplifiées.

Le travail de thèse portera sur la modélisation et la simulation « fully coupled » et 2D/3D du comportement hydromécanique des ouvrages de fermeture avec une représentation explicite du couplage avec la perturbation alcaline. S'appuyant sur l'état des connaissances sur la perturbation alcaline sur les milieux argileux et le comportement hydromécanique des matériaux à base d'argilites et de d'argile gonflante, en termes de processus, de modèles de représentation et de codes de simulation numérique, la thèse s'attachera à établir un schéma conceptuel du couplage complet, à définir un ou des modèles de couplage et à mener des simulations numériques (couplage de codes existants en hydromécanique et en transport réactif ou couplage « fully integrated » dans un même code).

## Observation-surveillance : dispositifs techniques

### **6. Développement d'un système innovant de mesure continue du pH de manière locale ou répartie (milieu argileux, cimentaire ou ouvert)**

Le pH est un paramètre / indicateur de nombreux processus de durabilité des composants ouvrés d'un stockage et du comportement du milieu environnant (milieu géologique, milieu ouvert). Il existe déjà aujourd'hui une variété de dispositifs de mesure du pH ; ils présentent des limites notamment le besoin d'un étalonnage régulier et manuel, parfois avant chaque mesure.

Le travail de thèse portera sur le développement de techniques ou méthodes innovantes, par exemple 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. 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.

## 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 du projet Cigéo 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.

## Environnement

### **8. Etude des structures paysagères pour le maintien et l'optimisation des services écosystémiques associés**

Pour la conception du projet Cigéo en Meuse/Haute-Marne, l'Andra s'est fixée comme exigence de minimiser les incidences du projet, en s'appuyant sur la méthode ERC (Eviter, Réduite, Compenser). Cela concerne notamment les incidences sur les services écosystémiques rendus par le territoire d'accueil du projet, en particulier en visant à préserver et valoriser les structures paysagères existantes et/ou en en créant de nouvelles. En effet, les structures paysagères (haies, bosquets, fossés) sont des éléments essentiels permettant le bon fonctionnement des écosystèmes en garantissant refuge, nourriture et zone de nidification à nombres d'espèces. Elles constituent en outre des barrières naturelles aux éléments (vent, pluie) protégeant ainsi les activités agricoles ou d'élevage. Enfin elles correspondent également à la trame verte permettant de maintenir une

continuité entre les écosystèmes. L'application de cette exigence est traduite dans l'étude d'impact de la demande de déclaration d'utilité publique du projet Cigéo déposée par l'Andra en août 2020.

Le travail de thèse portera sur la recherche de l'optimisation fonctionnelle des structures paysagères sur un plan méthodologique, en tenant compte des spécificités biophysiques, de biodiversité et d'usage du territoire d'accueil du projet Cigéo, de manière à favoriser plus encore le maintien dans le temps des services écosystémiques rendus, par exemple les services de pollinisation, réduction des bio-agresseurs, maintien de la biodiversité.... L'impact sur les services écosystémiques de ces structures et de leur design pourra être évalué par l'étude d'analogues existants, et/ou des simulations dans le cadre de modélisations environnementales à l'échelle du territoire. Dans ce cadre, une expérimentation in situ pourra aussi être proposée.