

# Thèses de doctorat 2024

Appel à projets auprès des Laboratoires de recherches et des Établissements d'enseignement supérieur



## Les thèmes des thèses

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 2024, 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 et/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.

Les descriptions des thèmes de thèse et de la démarche de sélection sont téléchargeables et consultables sur le site

[www.andra.fr](http://www.andra.fr)

Rubrique « Recherche & développement »  
« La diffusion et la valorisation des acquis scientifiques et techniques ».

L'allocation de thèse sera accordée pour trois ans par l'Andra à compter du 1<sup>er</sup> octobre 2024

**Votre contact :**

Marie-Anne Bruneaux  
E-mail : [marie-anne.bruneaux@andra.fr](mailto:marie-anne.bruneaux@andra.fr)  
Tél : 01 46 11 82 68

# La géologie, l'aléa sismique et la géoprospective

## 1. Amélioration du modèle géologique, sédimentologique et pétrophysique des encaissants carbonatés de la formation du Callovo-Oxfordien

Le modèle hydrogéologique du secteur de Meuse/Haute-Marne s'appuie sur le modèle géologique et sédimentologique et sur les propriétés pétrophysiques et hydrodispersives obtenues essentiellement à partir des forages Andra. A l'instar du développement du modèle pétrophysique réalisé dans la formation hôte, des améliorations de la représentation des formations encaissantes de la formation du Callovo-Oxfordien (i.e. Dogger et Oxfordien calcaire) et de leurs propriétés pétrophysiques et hydrodispersives sont encore possibles par l'exploitation des données sismiques 3D haute-résolution acquises sur l'emprise de la zone de stockage.

En effet, les nouvelles méthodes d'analyse des données sismiques permettent aujourd'hui d'extraire un grand nombre de surfaces sismiques associées à différents attributs (amplitude, épaisseur, pendage...). Parallèlement, des analyses en faciès sismiques en lien avec les faciès sédimentologiques peuvent être réalisés entre différentes surfaces préalablement sélectionnées dans le bloc sismique inversé en impédances.

Durant cette thèse, il s'agira de tirer le meilleur profit des données diagraphiques (e.g. faciès, porosité, perméabilité), des nouvelles interprétations structurales dans les encaissants et de l'inversion du bloc sismique 3D dans l'objectif d'affiner le modèle sédimentologique et pétrophysique sur l'emprise de la zone de stockage par une représentation plus fine des faciès sédimentaires et de leurs paramètres pétrophysiques associés. Dans un second temps et fort de cette amélioration, il s'agira de mettre à jour le modèle sédimentologique et pétrophysique à l'échelle du secteur Meuse/Haute-Marne.

## Le Callovo-Oxfordien en grand

## 2. Modélisations thermomécaniques multi-échelles (verticale et horizontale) de l'état de contraintes au sein du Bassin parisien

Le projet Cigéo se localise en partie orientale du Bassin parisien à l'aplomb d'une pile sédimentaire mésozoïque de quelques 2000 m d'épaisseur reposant sur le socle hercynien. Cette région est caractérisée par l'absence de sismicité ainsi que de tout indice de déformation néotectonique sur les failles majeures et ce plus probablement depuis les 20 derniers millions d'années. Plus localement, la couche hôte des argilites du Callovo-Oxfordien devant accueillir le stockage à 500 m de profondeur est caractérisée par une surpression et un tenseur des contraintes anisotrope.

Afin d'apporter un éclairage sur les variations spatiales de l'état de contraintes de la croûte, il s'agira au travers de cette thèse d'identifier et de modéliser les processus physiques aux différentes échelles d'intérêt : de la lithosphère à la pile sédimentaire, de l'échelle locale à l'échelle régionale, des temps courts (quelques siècles) aux temps longs (million d'années). Pour ce faire, une approche multi-échelle pourra être mise en œuvre reposant sur des modélisations thermomécaniques (statiques voire dynamiques). Au travers des études de sensibilité, l'étudiant devra caractériser l'influence (1) de la rhéologie, de la cohésion et du couplage mécanique au sein de la pile sédimentaire, (2) des fluides et de la présence des aquifères, (3) des variations spatiales du flux de chaleur, et (4) des paramètres contrôlant le comportement mécanique de la lithosphère et – en particulier- de la croûte supérieure. Les conditions aux limites des modèles feront le lien entre la compression alpine, le flambage lithosphérique et crustal et l'identification de zones d'extrados en surrection soumises à de la tension et érosion, et d'intrados en affaissement soumises à de la compression et comblement.

L'approche statique (étude flexurale) constitue une première étape vers des approches dynamiques (modèles thermomécaniques long-terme) visant au travers de scénarios et modèles à évaluer les évolutions temporelles possibles de la sismicité et de l'activité potentielle des failles, de la surpression et de l'état de contraintes *in situ*, dans le cadre de la consolidation des connaissances pour le développement du projet Cigéo.

## La géomécanique du Callovo-Oxfordien

### 3. Caractérisation et modélisation micro/macro du comportement hydromécanique-gaz des roches argileuses

L'Andra a établi un socle de connaissances expérimentales sur la caractérisation de la migration du gaz, ainsi que 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 et des expérimentations réalisées dans le Laboratoire de recherche 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. D'autres part, l'amélioration des techniques d'imagerie et l'accroissement des capacités informatiques permettent d'acquérir et de traiter des images à partir desquelles il est possible de reconstituer les réseaux de pores au sein de l'argile. Des modélisations sur ces réseaux contribuent à préciser les pressions d'entrée et de percée au gaz et apporter des éléments sur l'initiation de la fracturation au gaz dans l'argilite du Callovo-Oxfordien.

L'objectif de cette thème de thèse sera (1) de mettre en œuvre des méthodes de caractérisation en se basant sur des techniques d'imageries (tomographie X, IRM, FIB/MEB...) pour compléter les connaissances sur les mécanismes de transfert de gaz dans les argiles (pression de percée, création de chemins localisés, fracturation du gaz...); (2) de développer/améliorer des méthodes numériques pour représenter les transferts eau/gaz à l'échelle des réseaux de pores acquis par imagerie et de coupler ces transferts avec la déformation du milieu; (3) de développer des modèles (discrets et/ou milieu continu équivalent) pour représenter les mécanismes d'initiation et de propagation des fractures induit par une sollicitation au gaz, à l'échelle macroscopique en s'appuyant sur les données expérimentales. Ces travaux contribueront à réduire les incertitudes sur les paramètres hydrauliques/gaz du Callovo-Oxfordien (pression d'entrée et de percée au gaz; perméabilités relatives à l'eau et au gaz; courbe de rétention d'eau...); de mieux représenter les mécanismes de migration de gaz dans l'argilite, l'initiation de la fracturation au gaz et les mécanismes de propagation des fractures existantes dans la formation du Callovo-Oxfordien dans le contexte du stockage.

### 4. Modélisation des processus de couplage (thermo)hydromécanique à 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 thermo-hydro-mécanique 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 et le passage possible à plus grande échelle (macroscopique, formation du Callovo-Oxfordien). L'objectif est de renforcer la description de phénomènes physiques qui ne sont pas accessibles par la caractérisation ou la simulation macroscopique tels que l'effet de l'eau libre et l'eau absorbée, l'origine de l'écroutissage thermique, etc. Le résultat de la thèse permettra de consolider les observations faites à l'échelle macroscopique et d'évaluer plus finement les marges en termes de modèle de comportement thermo-hydro-mécanique macroscopique appliqué à la conception et la sûreté.

## Les verses

### 5. Réactivité et transport des formes dissoutes et particulaires de contaminants depuis les verses ou les couvertures argileuses jusqu'au milieu naturel

Les verses du projet Cigéo et les couvertures argileuses des centres de stockage de l'Andra sont soumises à des phénomènes d'érosion et d'oxydation. Ces phénomènes induisent une altération minéralogique et physico-chimique des matériaux argileux constituant ces ouvrages de surface et peuvent potentiellement relarguer certains contaminants, tels que des éléments traces métalliques et des sulfates, vers l'environnement. Dans les conditions insaturées de surface et sous l'effet des pluies, ces contaminants peuvent être transférés jusqu'au milieu naturel sous forme dissoute par infiltration et/ou ruissellement, et sous forme particulaire dans les matières solides mobilisées sous forme de matières en suspension dans les eaux de ruissellement. Le mode de transport affecte fortement la distance de transfert et le temps de résidence des contaminants dans les systèmes de collecte et de traitement des eaux qui doivent être dimensionnés au juste besoin pour maîtriser les rejets dans le milieu naturel. Le travail de thèse consistera à améliorer la compréhension et la représentation des phénomènes de transport réactif sous formes dissoutes et particulaires lors du ruissellement sur les verses ou sur les couvertures argileuses de l'Andra par des approches à la fois expérimentales et de modélisation.

## La géochimie des matériaux argileux et cimentaires

### 6. Réactivité des fractions organiques et inorganiques des argilites du Callovo-Oxfordien lors de leur oxydation : quantification de l'intensité et de l'extension des processus

Dans le projet de stockage Cigéo, les argilites du Callovo-Oxfordien subissent au cours de l'excavation des modifications de leur environnement. La déshydratation, l'oxydation, la décompaction et la fracturation sont les quatre principaux processus associés subis par l'argilite. La conséquence de l'oxydation partielle des argilites en paroi d'alvéole est une acidification du milieu, en relation avec l'oxydation des pyrites d'une part et la déstabilisation du système carbonate d'autre part. Ce phénomène entraîne un transitoire redox et acido-basique dans la zone d'interface entre le milieu géologique et le chemisage en acier de l'alvéole de déchets vitrifiés de haute activité, avec pour conséquence une corrosion rapide de l'acier. L'oxydation a également un effet sur la réactivité de la matière organique contenue dans la roche dont les mécanismes et conséquences sont encore à décrire précisément.

L'objectif de cette thèse est d'une part d'affiner les connaissances sur les processus liés à l'oxydation (altération des minéraux et de la matière organique, émissions de gaz) et d'autre part de quantifier l'extension spatiale et l'intensité réactionnelle de ces processus en paroi d'alvéoles. Un des challenges est la maîtrise des conditions triphasiques et insaturées en eau. Le doctorant concevra et réalisera dans son laboratoire d'accueil des expériences à petite échelle permettant de caractériser et de quantifier l'ensemble des processus réactionnels dans des conditions physicochimiques contrôlées puis intégrera ou participera à l'intégration de ces résultats dans des modèles transports-réactifs aux échelles de ces essais et expériences. L'Andra pourra mettre à disposition du doctorant des données et/ou des échantillons issus d'essais conduits dans son Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne en lien avec la thématique de thèse, pour la compléter ou y apporter des éléments de comparaison.

### 7. Néof ormation des zéolithes dans les interactions ciments/argiles dans le contexte des stockages de déchets radioactifs : Identification des conditions physico-chimique favorables et acquisition des cinétiques de précipitation

Dans les stockages de déchets radioactifs en exploitation ou en cours de conception par l'Andra, les matériaux cimentaires de différentes natures se trouvent en interface avec des argiles ou des matériaux à base d'argiles de compositions différentes. Les interactions « ciment-argiles » sont étudiées depuis de nombreuses années, expérimentalement et numériquement et les processus chimiques aux interfaces sont décrits dans la littérature scientifique. Parmi les verrous de

connaissance identifiés, la néoformation de zéolithes joue un rôle significatif car elle influe sur l'intensité et l'extension des transformations minéralogiques aux interfaces. Des progrès ont été réalisés notamment quant à la connaissance thermodynamique de ces phases (base de données Thermochimie de l'Andra). Cependant, le socle de connaissances en matière d'identification des conditions de formation et de données cinétiques réactionnelles doit encore être enrichi.

Le projet de thèse devra définir un domaine paramétrique ( $T^{\circ}\text{C}$ , pH, concentrations en alcalin, alcalino-terreux, silice, aluminium...) représentatif des différentes interfaces ciment/argiles rencontrées dans les stockages de l'Andra : nature des ciments (CEM I, II, III, V), nature des argiles (argilites du Callovo-Oxfordien, bentonites, mélanges bentonite-sables siliceux ou calcaire), températures de  $25^{\circ}\text{C}$  à  $50^{\circ}\text{C}$ . Dans ce domaine, des expériences de synthèse et/ou d'interaction de complexité croissante entre minéraux/matériaux devront permettre d'identifier les différents types de zéolithes qui peuvent se former ainsi que la cinétique de leur formation. Ces essais seront modélisés et confrontés à des modélisations existantes de type transport-réactif.

## Les alvéoles HA et les conteneurs de stockage HA

### 8. Optimisation des propriétés mécaniques de céramiques techniques pour application potentielle au stockage des déchets radioactifs

Dans une démarche d'optimisation du stockage tout au long de la phase d'exploitation de Cigéo, des solutions complémentaires ou en remplacement de celles retenues aujourd'hui sont envisagées (répondant au même niveau d'exigences que celles actuellement définies). A ce titre, des matériaux alternatifs aux matériaux métalliques sont notamment à l'étude et un intérêt fort est porté sur les matériaux céramiques pour les conteneurs de stockage des déchets HA, l'objectif étant la réduction de la production de dihydrogène par corrosion.

Dans ce contexte, le développement d'une solution innovante de conteneur HA en alumine submicronique est en cours. L'exigence première de ce conteneur résidant dans le maintien de son intégrité durant une période d'environ 500 ans, il est recherché un niveau le plus élevé possible de résistance mécanique du matériau utilisé afin de minimiser l'épaisseur du composant.

Les propriétés mécaniques du matériau sont intimement liées à sa microstructure et à sa composition. Pour identifier ces liens, une étude fine, systématique et paramétrique doit être menée pour déterminer l'effet des paramètres d'élaboration sur la résistance des pièces fabriquées. La finalité de ce travail de thèse consiste à établir une méthodologie permettant de fabriquer des céramiques aux propriétés mécaniques optimisées et maîtrisées de façon reproductible. Un prototype à échelle  $\frac{1}{2}$  pourra aussi être produit.

## Les galeries, les alvéoles MA-VL et les carrefours

### 9. Rôle des processus biotiques sur la stabilité des produits de dégradation hydrosolubles dans le contexte des argilites du Callovo-Oxfordien. Application à l'expérimentation DRO.

La dégradation de polymères présents dans certains déchets MA-VL conduit à la production et au relâchement de molécules organiques appelées produits de dégradation hydrosolubles (PDH), qui peuvent avoir des propriétés de complexation importantes, c'est-à-dire former des complexes en solution, avec les radionucléides (notés RN-ORG) et favoriser ainsi leur mobilité dans le milieu géologique environnant. Le comportement de ces molécules organiques au sein du Callovo-Oxfordien constitue ainsi un sujet d'intérêt quant au devenir des radionucléides issus des déchets MA-VL. Les processus microbiens peuvent notamment limiter la migration de ces molécules par leur (bio-)dégradation. L'expérimentation DRO conduite au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne étudie le comportement des principales molécules aux propriétés complexantes qui seraient issues de certains déchets MA-VL, en particulier l'acide isosaccharinique (ISA) et les phtalates et vise notamment à identifier le rôle des processus de biodégradation.

Ce travail de thèse a pour objectif d'évaluer l'impact de l'activité microbiologique sur la stabilité et la migration au sein du Callovo-Oxfordien de molécules organiques provenant des alvéoles MA-VL. La démarche s'appuiera sur la caractérisation des produits de dégradation de ces molécules organiques qu'ils soient sous forme aqueuse ou gazeuse afin d'obtenir des bilans de masses. Les molécules organiques investiguées seraient les principaux PDH et des molécules au pouvoir chélatant telles EDTA et TBP ; ces molécules seraient étudiées seules et sous formes de complexes RN-ORG étant donné que c'est sous cette spéciation que les molécules organiques parviennent dans le Callovo-Oxfordien (avec pour origine l'alvéole MA-VL). Il s'agirait ainsi d'établir la stabilité à long terme des molécules elles-mêmes et des complexes qu'elles composent avec certains radionucléides dans l'environnement biogéochimique du Callovo-Oxfordien.

## **10. Développement de bétons à renforts non-métalliques - Interface renfort / matériau cimentaire**

Dans le cadre du projet de stockage géologique profond, l'Andra recherche des solutions alternatives aux bétons armés conventionnels de manière à minimiser la quantité de renforts métalliques dans les structures. Ce besoin d'optimisation est en lien avec la production de dihydrogène par corrosion des matériaux métalliques en milieu anoxique. Dans le cadre d'une démarche de sûreté, l'Andra cherche à accroître les marges disponibles concernant les conséquences de la production d'hydrogène en phase d'après-fermeture dans le stockage.

Dans l'optique de limiter l'emploi d'acier pour les structures de stockage en bétons armés, l'Andra étudie la possibilité d'utiliser des renforts non métalliques, que ce soient des fibres ou des barres. Deux thématiques sont identifiées sur ce sujet : la fonctionnalisation et/ou le traitement de l'ensimage (préférentiellement fibres de carbone) et la formulation et/ou la fonctionnalisation des résines pour les PRF<sup>1</sup>.

La rhéologie des mortiers/bétons est fortement impactée par l'introduction des fibres, par exemple dans le cas des fibres de carbone lorsque leur état de surface n'est pas fonctionnalisé/traité. L'objectif est donc d'évaluer l'apport de traitements de surface et de fonctionnalisations, de manière à améliorer la compatibilité des fibres avec le matériau cimentaire et leur résistance aux sollicitations rencontrées pendant l'étape de malaxage.

L'un des enjeux de démonstration est celui de la durabilité de ces composants et en particulier celle des matériaux qui vont se trouver en interface avec les matériaux cimentaires (l'ensimage des fibres ou les résines des barres PRF). L'objectif est ainsi de quantifier la durabilité des matériaux aux interfaces « matériaux cimentaires / renfort (ensimage, résines renforts polymères) en fonction de leur nature et des conditions de vieillissement.

## **11. Développement de bétons à renforts non-métalliques - Étude de la distribution et de l'orientation des fibres dans le béton armé/fibré**

Dans le cadre du projet de stockage géologique profond, l'Andra recherche des solutions alternatives aux bétons armés conventionnels de manière à minimiser la quantité de renforts métalliques dans les structures. Ce besoin d'optimisation est en lien avec la production de dihydrogène par corrosion des matériaux métalliques en milieu anoxique. Dans le cadre d'une démarche de sûreté, l'Andra cherche à accroître les marges disponibles concernant les conséquences de la production d'hydrogène en phase d'après-fermeture dans le stockage.

Dans l'optique de limiter l'emploi d'acier pour les structures de stockage en bétons armés, l'Andra étudie la possibilité d'utiliser des renforts non métalliques, que ce soient des fibres ou des barres. L'utilisation de fibres dans les bétons pour des ouvrages de grandes dimensions pose la question des conséquences de préparation et de mise en œuvre sur l'homogénéité de distribution et les conséquences mécaniques sur les ouvrages. Si dans un milieu homogène, ce type d'information est déjà étudié, ce n'est pas le cas dans le cas d'ouvrages mixtes armés/fibrés. Quelles sont les conséquences physiques de la présence de cages d'armatures sur la mise en place d'un béton fibré et quelles recommandations peut-on avancer pour une telle mise en œuvre ?

---

<sup>1</sup> Polymères renforcés de fibres

## 12. Corrosion dans les bétons avec des liants à fort taux de substitution

L'industrie du Génie Civil est dans une phase de transition pour s'adapter au contexte environnemental actuel. La mise en place de la taxe carbone et les difficultés d'approvisionnement pour certaines matières premières (exemple des cendres volantes, laitiers de hauts-fourneaux) conduit les cimentiers à développer de nouveaux ciments. Avec l'évolution des compositions des bétons qui vont être mis en œuvre dans un futur proche, se pose la question du maintien à l'état passif des aciers en fonction des conditions physico-chimiques imposées par ces nouveaux matériaux.

Les liants à forts taux de substitution (CEM II/C-M, CEM VI, ajouts méta kaolin, argiles calcinées...) vont présenter des caractéristiques différentes de celles qui règnent dans des bétons à base de ciment plus classiques, principalement à base de Portland. Pour des ouvrages dont la durabilité visée est séculaire, il est important d'évaluer les conséquences physiques de ces variations sur l'amorce et la propagation de la corrosion d'armatures ou de fibres en acier.

La qualité de l'interface armature/béton, mais aussi l'influence de l'épaisseur et de la qualité du béton d'enrobage sont des paramètres clés vis-à-vis du développement de la corrosion. Au sein d'un béton armé, la corrosion est à l'origine d'un endommagement mécanique du béton sous le double effet de l'expansion des produits de corrosion (générant des contraintes mécaniques internes) et de la perte de section et d'adhérence des aciers qui fait perdre sa capacité portante à la structure. Pour les composants en béton armé du centre de stockage Cigéo, le scénario envisagé est un endommagement mécanique du béton en raison de la croissance de la couche d'oxydes à l'état passif. L'Andra souhaite consolider ce scénario dans un contexte d'évolution des matériaux cimentaires et acquérir des informations phénoménologiques dans ces conditions physico-chimiques particulières afin de décrire au mieux l'évolution des composants en béton armé du centre de stockage Cigéo (tels que conteneurs, voussoirs, radier...).

## 13. Comportement d'un anneau de voussoirs à couche compressible : suivi du chargement mécanique par capteurs noyés

Pour accroître la marge de dimensionnement des voussoirs vis-à-vis du comportement différé de la roche argileuse lors de la phase d'exploitation du projet Cigéo, une solution innovante a été développée par l'Andra et ses partenaires afin de limiter l'effet de la convergence du terrain sur le chargement du revêtement en béton en « plafonnant » les efforts dans les voussoirs. Cette solution repose sur l'utilisation d'une couche compressible intégrée à l'extrados du voussoir, qui limite les contraintes radiales transmises à l'anneau de voussoir tout au long de la phase centennale d'exploitation. Un banc d'essais échelle 1 permettant de soumettre cette solution à un champ de déplacements isotrope ou anisotrope reproduisant la convergence du terrain à différents âges de la vie des ouvrages a été mis en place à l'Université Gustave Eiffel. Depuis 2021, des essais sont conduits sur anneau de voussoirs avec différents types de chargement – isotrope, anisotropes de ratio variables, avec ou sans couches compressibles. Ces essais de grande envergure sont instrumentés de façon exhaustive générant un grand volume de données brutes (250 capteurs utilisés, dont une centaine noyée dans les voussoirs).

Sur la base des données acquises à travers cette campagne d'essais (15 essais seront réalisés à l'horizon 2025), les travaux de thèse viseront à développer un outil permettant de caractériser la santé structurelle d'un anneau de voussoirs instrumentés à partir de la seule instrumentation interne.

## 14. Développement d'une méthodologie d'analyse des chargements des revêtements des ouvrages souterrains dans le Callovo-Oxfordien

Dans le cadre des travaux de recherche menés depuis vingt ans dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, dix-sept types et configurations de soutènements et/ou revêtements sont suivis et analysés. Actuellement, les chargements (mesures de déformations et de pression) des revêtements sont comparés en partie à différentes méthodologies de simulation roche/structure.

L'objectif de la thèse est d'améliorer la méthodologie d'analyse des mesures de déformation et pression totale pour déterminer le chargement mécanique des revêtements coulés ou préfabriqués (état de contrainte dans la structure) afin d'analyser leurs évolutions dans le temps vis-à-vis de méthodes analytiques ou d'analyse inverse dans la structure. Une première étape serait de mieux prendre en compte le retrait/fluage du béton, les effets thermiques liés à la ventilation (dilatations empêchées, etc.) ainsi que la variabilité des caractéristiques mécaniques des bétons à l'échelle des revêtements. Dans un deuxième temps, l'analyse pourra être complétée avec l'évolution des déformations dans la roche afin d'intégrer l'interaction roche/structure et les spécificités de chacune (orientation, rigidité, phasage).

## Les ouvrages de fermeture

### 15. Détermination d'une loi de comportement cyclique des matériaux des ouvrages de fermeture soumis à un séisme

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 descenderie). La conception et le dimensionnement de ces ouvrages de fermeture prend en compte les processus d'évolution THMC (thermo-hydro-mécaniques-chimiques) de manière enveloppe et prudente sur la base de modélisations et simulations numériques.

Un programme visant à modéliser le comportement des scellements sous sollicitation sismique a démarré récemment. Cependant, la caractérisation du comportement cyclique des matériaux de remblai et de scellement est incomplète et peu de données sont disponibles sur les matériaux argileux tels que ceux envisagés dans le stockage.

Les travaux de thèse viseront, via un programme expérimental, à acquérir des données sur le comportement sous sollicitation cyclique des matériaux d'ouvrages de fermeture pour développer une loi de comportement exploitable dans le cadre de modélisations à l'échelle des scellements de Cigéo.

## Les dispositifs de surveillance des composants

### 16. Analyse et interprétation de données sismiques actives enregistrées par fibres optiques acoustiques pour la reconnaissance de la zone endommagée dans la galerie grand diamètre GRD6

Les fibres optiques acoustiques présentent de nombreux avantages et trouvent de plus en plus d'application en sismologies terrestre et sous-marine, en surveillance de trafics routier et ferroviaire ou encore dans l'industrie pétrolière (suivi de fuite de gaz par exemple). Cette technologie prometteuse est encore très peu étudiée aux échelles d'application de l'Andra (quelques mètres à quelques dizaines de mètres). Cette thèse vise à étudier la réponse des fibres optiques acoustiques dans les conditions de mise en œuvre du démonstrateur d'alvéole MA-VL (expérimentation OMA) du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne pour l'imagerie de la zone endommagée. L'analyse des données sera réalisée en fonction d'un certain nombre de paramètres géométriques (distance source-émetteur, distance le long de la fibre, angle d'incidence source -émetteur ...) et de paramètres propres à l'interrogateur DAS utilisé (résolution spatiale, résolution temporelle, bruit instrumental...). Les signaux seront comparés aux signaux enregistrés par les géophones et les hydrophones dans les mêmes conditions expérimentales. Il s'agira de mettre en place une méthodologie pour le contrôle qualité des données, pour la reconnaissance et le pointé des ondes d'intérêt et pour les traitements permettant de remonter à une image en vitesses de la zone étudiée. Cette thèse reposera sur les données existantes mais pourra également recourir à la réalisation d'autres tests au laboratoire de recherche souterrain (autres fibres, autres interrogateurs DAS, autres géométries du dispositif).



## Le numérique, le digital et le *data mining*

### 17. Une méthode d'apprentissage statistique PIBS appliquée à la simulation numérique

Dans le domaine de la simulation numérique, les travaux de recherche ont longtemps concerné le développement de nouveaux schémas numériques ou de solveurs linéaires performants capables en particulier de tirer profit du parallélisme offert par les dernières architectures matérielles. Cependant, la résolution de problèmes fortement non-linéaires sur de gros systèmes reste encore un défi particulièrement difficile à relever. La modélisation du transport réactif en milieu poreux est un des domaines où ce type de problème est le plus souvent rencontré. Pour ce cas d'application, les simulations doivent à la fois résoudre les équations de transport de solutés dans des domaines géométriques complexes ou bien impliquant des matériaux très hétérogènes et des équations fortement non-linéaires liées à l'équilibre chimique et à la précipitation/dissolution.

Les travaux réalisés par l'Andra dans le cadre de la thèse de Mary Savino (2021-2024) donnent des résultats très encourageants dans le domaine du transport réactif avec le développement de deux approches originales : l'une en *active learning* reposant sur les processus gaussiens qui permet d'optimiser la base d'apprentissage pour construire un *surrogate model*, l'autre à base de B-splines capable de fournir très rapidement un *surrogate model* performant en termes de précision à partir d'une base d'apprentissage prédéfinie. Ces travaux innovants confirment ainsi l'intérêt de poursuivre les efforts de recherche pour développer des méthodes « d'Intelligence Artificielle » appliquées à la simulation numérique pour l'ensemble des domaines d'application de l'Andra.

La méthode des *Physics Informed Neural Networks* (PINNS) est actuellement une des méthodes très étudiées qui combinent des réseaux de neurones et des équations physiques. Le principe consiste à minimiser non plus seulement l'erreur du modèle par rapport à des points d'entraînement mais aussi l'erreur commise par rapport aux résultats attendus par les équations physiques. Ce processus vise à ce que le modèle de réseau de neurones propose des solutions qui respectent une physique sous-jacente (par exemple des lois de conservation).

L'objectif de la thèse sera d'utiliser les travaux réalisés sur les B-splines pour y incorporer la prise en compte d'équations physiques. Cela permettrait d'aboutir à une méthode *Physics Informed B-Splines* (PIBS) tout à fait nouvelle et potentiellement plus performante que les PINNS. Comme pour la thèse précédente, un des défis sera d'y ajouter une méthode de sélection de variables pour l'optimiser en termes de performance (vitesse et précision). L'application de cette nouvelle méthode pourra à nouveau être testée en transport réactif, ce qui permettra une comparaison avec les résultats obtenus au cours de la thèse précédente, ou pour l'estimation d'indicateurs relatifs à des conditions d'écoulements en conditions non saturées.

## L'environnement et le climat

### 18. Evolution et dynamiques des espaces ruraux dans un contexte d'implantation de projet industriel

Situé au cœur d'une vaste région rurale de l'est de la France faiblement peuplée et en déprise industrielle depuis plus d'un siècle, l'implantation du projet de stockage géologique profond Cigéo est de nature à changer la configuration des territoires environnants en termes de densité, mixité fonctionnelle et composition urbaine. En effet ce projet d'envergure et sur le long terme se déploierait, s'il est autorisé, sur une durée centennale en plusieurs phases d'intensités variables : une phase initiale de chantier pour la construction des infrastructures d'accès, de supports et des bâtiments nécessitant l'influx important de personnel spécifiquement employé pour la construction initiale ainsi que l'implantation d'entreprises supports ; suivie d'une phase d'exploitation/construction plus stable en terme de personnel, de modification paysagère mais marquant le démarrage des flux de déchets radioactifs. L'apport de population, les besoins du chantier ainsi que les développements économiques attendus changeront probablement la trajectoire socio-économique de ce territoire.

Le thème proposé s'inscrit dans le cadre des recherches en sciences Humaines et sociales qui visent à étudier les liens entre les activités humaines (mobilité, réindustrialisation, transitions écologiques, activités récréatives et culturelles etc.) et les changements socio-économiques des territoires ruraux.

Le travail de recherche consistera tout d'abord à caractériser la configuration socio-économique du ou des territoire(s) impacté(s) par le projet Cigéo, d'évaluer quelles sont leurs singularités par rapport à d'autres territoires ruraux accueillant des "grands projets industriels" similaires (nature de l'activité, investissements, effectif). Ensuite, à partir de cas d'études (projets déjà réalisés) et de simulation des évolutions socio-économiques engendrées par les différentes phases du projet Cigéo, d'évaluer quelles pourraient être à moyen et long termes les effets sur la mobilité, la fourniture de services (publics, services culturels ou récréatifs...) ou l'accès à l'éducation par exemple sur le(s) territoire(s) environnant(s).

### **19. Volatilisation et élimination naturelle du chlore, de l'iode et du sélénium dans les sols de Meuse/Haute-Marne**

Le cycle global du chlore, de l'iode et du sélénium implique un retour du sol vers l'atmosphère, via des processus biotiques ou abiotiques de volatilisation. Comme leurs analogues stables, le  $^{36}\text{Cl}$ , l' $^{129}\text{I}$ , et le  $^{79}\text{Se}$ , sont soumis à une dynamique complexe dans le sol et la végétation où il existe un équilibre entre immobilisation et production de formes organiques (voire inorganiques) volatiles en fonction des caractéristiques éco-climatiques locales.

A ce jour, la volatilisation de ces éléments est ignorée dans les modèles de transfert de l'Andra. La mobilisation de ces éléments à travers les interfaces sol-plante-atmosphère revêt donc une importance cruciale pour objectiver le statut des relâchements hypothétiques dans les biosphères de Cigéo, et le risque de transfert à la chaîne alimentaire.

Le travail de recherche consistera à déterminer les flux de volatilisation de ces éléments à l'interface sol/air dans le contexte des écosystèmes représentatifs du territoire de Cigéo.