



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



THÈSES DE DOCTORAT 2026

Appel à projets auprès des laboratoires de recherche
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 plus de 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 2026, 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

Rubrique

« Nos missions »

↳ « Études et recherches »

↳ « La diffusion et la valorisation »

L'allocation de thèse sera accordée
par l'Andra pour trois ans à compter
du 1^{er} octobre 2026.

Votre contact :

Marie-Anne Bruneaux
marie-anne.bruneaux@andra.fr

Les alvéoles HA et les conteneurs de stockage HA

1. Mise au point d'une méthode d'assemblage de pièces en céramique d'un conteneur de stockage de déchets HA par une approche intégrée couplant expériences et modélisations

Le développement par l'Andra de solutions innovantes incluant de nouveaux matériaux non métalliques pour l'alvéole HA¹ de l'INB² Cigéo s'inscrit dans une démarche prospective (quartier de stockage HA à l'horizon 2080) visant à démontrer la faisabilité scientifique et technique de substituer certains aciers bas carbone actuellement retenus en référence. L'objectif est de limiter la production de dihydrogène ($H_2(g)$) induite par corrosion anoxique des aciers dans l'alvéole, de façon à accroître la robustesse de la démonstration de sûreté (i) en exploitation (risque ATEX possiblement éliminé si un scénario tout céramique est mis en œuvre) et (ii) en après-fermeture (diminution de l'amplitude du pic de pression de gaz).

Un des composants concerné par ces études de fabricabilité est le conteneur de stockage HA. Ce conteneur doit protéger le colis primaire et pour ce faire, doit rester étanche à l'eau durant 500 ans. Cette exigence, qui s'applique à la zone de scellement du corps et du couvercle du conteneur, constitue un défi scientifique et technique majeur. Pour aborder ce défi, il est proposé de développer une méthode globale d'assemblage intégrant la mise au point non seulement d'un moyen de chauffage localisé et d'un matériau de scellement de formulation adaptée à celui-ci, mais également d'outils et de protocoles de qualification du scellement. Ceci requiert de mettre en œuvre une approche duale couplant expériences et modélisations :

- La partie expérimentale visera à (i) formuler le matériau de scellement, (ii) comprendre les mécanismes physico-chimiques mis en jeu lors de l'adhésion (pure) sur la zone scellée et (iii) évaluer la tenue du scellement dans les conditions de chargement représentatives de l'alvéole ;
- La partie modélisations remplira deux objectifs : (i) un appui à la partie expérimentale tant pour la définition et le dimensionnement des essais que pour l'interprétation des résultats et (ii) une simulation du comportement de la zone scellée à l'échelle du conteneur de stockage placé dans un alvéole afin d'adapter sa géométrie, et potentiellement celle du conteneur en entier.

Le programme de thèse pourra également proposer l'étude de la tenue à long terme des matériaux et de l'assemblage dans des conditions couplant les sollicitations prévues dans un alvéole HA, à savoir l'irradiation, la corrosion et les contraintes mécaniques.

2. Rôle d'une interface en coulis cimentaire sur le flambement confiné d'un tube en acier

L'exigence de récupérabilité des colis de stockage de déchets radioactifs de haute activité (HA) dans Cigéo, impose de garantir la stabilité mécanique des alvéoles HA pendant environ un siècle. Le chemisage (tube en acier) qui équipe ces ouvrages doit ainsi résister au flambement sous contact pendant cette durée, au cours de laquelle il va être soumis à un chargement mécanique croissant appliqué par le milieu confinant et à une dégradation progressive par corrosion. Si les travaux menés sur le sujet ont clairement mis en évidence l'apport du confinement sur la pression critique par rapport au cas d'un flambement libre, le rôle de la présence d'une interface en matériau cimentaire entre le chemisage et la roche hôte, et plus particulièrement le rôle de sa rigidité, reste à préciser.

L'objectif des travaux de thèse sera de caractériser les conditions d'apparition du flambement pour cette configuration d'un milieu confinant bi-matériau. Des essais préliminaires ont en effet montré une bifurcation de comportement en fonction de l'épaisseur de l'interface pour la gamme de rigidité du matériau cimentaire envisagée pour Cigéo. Pour certaines conditions (rigidité du matériau cimentaire, épaisseur de l'interface), le flambement ne semble plus capturable, ni expérimentalement, ni numériquement, par le seul suivi de la pression externe appliquée au milieu confinant (apparition d'un pic), comme c'est le cas habituellement. Ce comportement conduit à s'interroger sur le rôle de l'interface dans la reprise des efforts appliqués par le milieu confinant et transmis au chemisage. Sur la base d'une approche alliant essais sur maquettes à échelle réduite et modélisation numérique, les travaux de thèse devront permettre de préciser le critère de flambement pour ces conditions particulières et d'identifier sa sensibilité aux différents paramètres de l'interface, notamment rigidité et épaisseur (valeur moyenne et homogénéité).

¹ Haute activité

² Installation nucléaire de base

3. Corrosion en atmosphère humide à l'intrados du chemisage de l'alvéole HA

Le concept actuel de Cigéo prévoit un inertage de l'intérieur de l'alvéole HA permettant de maintenir une teneur en O₂ inférieure à 1 % et donc des conditions peu oxydantes. Les aciers de l'intrados du chemisage et de l'extrados du conteneur de stockage seront principalement soumis à une corrosion en atmosphère humide.

De premiers travaux ont permis d'étudier la corrosion de ces aciers en atmosphère humide à 1 % d'O₂ et 50 °C (température maximale prévue pour le quartier pilote HA). Cependant, des variations de la teneur en O₂ entre l'anoxie et 1 % sont attendues entre deux inertages. De brefs passages à l'air doivent également être envisagés en cas de réouverture des alvéoles pour des contrôles durant la phase d'exploitation. Afin de prendre en compte ces variations, des essais de corrosion en atmosphère humide à 50 °C sur les aciers du chemisage et du conteneur de stockage devront être réalisés avec un cyclage de O₂ entre l'anoxie et 1 %. De brefs passages à l'air seront également réalisés.

L'influence de la température des surfaces métalliques sur les processus de corrosion en atmosphère humide sera étudiée plus finement. En effet, des zones plus chaudes (peau de conteneur) et des points plus froids (chemisage en tête d'alvéole) sont attendus, limitant ou favorisant la condensation d'un film d'eau nécessaire à la corrosion (et à la dissolution de l'oxygène gazeux).

Les travaux de thèse proposés devront donc permettre d'étudier l'influence de la teneur en oxygène et de la température des surfaces métalliques sur les processus de corrosion en atmosphère humide dans l'alvéole HA.

Les galeries, les alvéoles MA-VL et les carrefours

4. Comportement à très long terme des galeries de déchets radioactifs MA-VL³

Le dimensionnement des ouvrages du centre de stockage Cigéo assure leur tenue mécanique et leur stabilité pendant la phase de fonctionnement (période séculaire d'exploitation). Au-delà de cette période, le milieu géologique continue à converger du fait de son comportement différé. De plus, la dégradation chimique des ouvrages (lixiviation, carbonatation, corrosion, etc.) due à l'arrivée de l'eau interstitielle de la formation hôte dans l'ouvrage mènera à une dégradation des propriétés mécaniques et de la tenue mécanique. Par ailleurs, la corrosion des produits métalliques générera de l'hydrogène et une montée lente de la pression du gaz. Etudier le comportement à long terme des ouvrages permettra d'évaluer leur tenue mécanique postrupture et les effets induits sur la roche hôte et les composants de l'ouvrage.

L'objectif des travaux de thèse sera de proposer des schémas numériques robustes prenant en compte les couplages multiphysiques pour étudier la rupture du revêtement des ouvrages du centre de stockage Cigéo et les conséquences de cette rupture sur les réponses hydromécaniques de la roche hôte (telles que le sur-endommagement au champ proche) et des composants de l'ouvrage (telles que la consolidation du remblai). Les résultats de la thèse permettront de consolider les connaissances sur le comportement des ouvrages en après-fermeture et de conforter les marges de sûreté.

³ Moyenne activité à vie longue

Les ouvrages de fermeture

Après une période d'exploitation séculaire, le centre de stockage sera fermé. Lors de cette fermeture, toutes les galeries seront remblayées et des scellements seront positionnés localement afin de limiter les écoulements d'eau au sein des ouvrages. Les scellements comportent un noyau constitué d'un mélange bentonite/sable et des massifs d'appui en béton contribuant à confiner le noyau. La capacité de gonflement du noyau lui permet d'exercer une pression de gonflement sur la paroi lors de sa resaturation. Cette pression favorise l'autocolmatage de la zone fracturée induite par l'excavation des galeries et limite le transport des radionucléides le long des ouvrages. Les argilites excavées lors du creusement sont réutilisées pour le remblaiement des galeries.

5. Comportement hydromécanique-gaz des interfaces

Une des questions clés dans les évaluations de la stabilité mécanique et des performances des scellements concerne le comportement et les propriétés des interfaces entre les différents matériaux qui les composent telles que : noyau/béton ; remblai/béton ; noyau/argilite du Callovo-Oxfordien. Dans les scellements des liaisons surface-fond (descenderies, puits), le noyau sera en contact avec les argilites les plus riches en carbonate (unité silto-carbonatée (USC), unité de transition (UT)). L'interface entre le noyau et l'argilite est de plusieurs dizaines de mètres pour ces ouvrages. Les mécanismes de transfert de gaz dans les zones d'interface entre le noyau et le milieu géologique (noyau/USC, noyau/UT et noyau/UA⁴) représentent donc un enjeu important pour évaluer le comportement des scellements à long-terme.

L'objectif des travaux de thèse sera de caractériser les propriétés et le comportement hydromécanique-gaz des interfaces entre les matériaux constituant le scellement et les différentes unités géologiques du Callovo-Oxfordien, notamment : la résistance au cisaillement, la perméabilité à l'eau et les mécanismes du transfert de gaz. Des techniques innovantes telles que l'imagerie devront être utilisées pour appréhender le comportement de ces interfaces.

Les résultats permettront de fournir les paramètres des interfaces pour alimenter les simulations numériques hydro-mécanique-gaz et évaluer les performances des scellements.

6. Influence du type de sable et de l'état des matériaux dans l'évolution hydromécanique-gaz des mélanges bentonite/sable et argilite/sable

Depuis plusieurs années, l'Andra, comme ses homologues internationaux, mène des recherches sur les mélanges bentonite/sable pour les noyaux de scellement et sur les mélanges à base de matériaux excavés pour le remblaiement des galeries.

Ces matériaux doivent répondre à des exigences strictes, notamment en termes de propriétés hydromécaniques (HM) et de comportement au gaz. Les études sur les mélanges argile/sable montrent qu'un ensemble de paramètres tels que la granulométrie des matériaux utilisés, la forme des grains, la nature du sable ainsi que l'état initial hydrique et la densité influencent notablement les propriétés HM-gaz finales de ces matériaux après resaturation. Lors de la mise en place à grande échelle dans les ouvrages de stockage, les distributions granulométriques des matériaux sont supérieures à celles utilisées pour les mesures de propriétés en laboratoire, et une variabilité de la densité sèche et de la teneur en eau est inhérente aux processus industriels d'installation. Ces observations soulèvent une question clé : dans quelle mesure le type de sable et l'état initial des matériaux affectent-ils à l'échelle de l'ouvrage les propriétés hydromécaniques et de transfert des gaz des mélanges argile/sable ?

L'objectif des travaux de thèse sera d'explorer, via des essais en laboratoire, le rôle du sable (forme, nature minéralogique, granulométrie) et de l'état initial hydrique et de la densité du matériau sur les propriétés finales HM-gaz obtenues après resaturation. Les paramètres clés à saturation sont la perméabilité à l'eau, la percolation du gaz (pression d'entrée et perméabilité relative au gaz) et les modules.

Les données acquises, associées à la base de connaissances existante sur les matériaux des ouvrages de fermeture de Cigéo, seront utilisées via des techniques de *machine learning* pour prédire les propriétés hydromécaniques et physiques des matériaux.

⁴ Unité argileuse, dans laquelle seront situés les alvéoles de stockage

Les installations de surface

7. Durabilité des géomembranes d'étanchéité à base de Polychlorure de Vinyle Plastifié (PVC-P)

Le centre de stockage Cigéo comprendra des installations en surface et en souterrain. Les installations de surface devront être équipées de dispositifs d'étanchéité et de drainage enterrés, de manière à empêcher toute venue d'eau dans les ouvrages. Ces dispositifs doivent garantir une étanchéité tout au long de la période de fonctionnement, c'est-à-dire sur une durée à minima séculaire. Des dispositifs d'étanchéité et de drainage existent industriellement, mais leur durabilité n'est souvent pas disponible ou est inférieure à ce qui est requis dans le cas présent. En effet, les études mises en œuvre visent avant tout à démontrer des durées de vie de quelques dizaines d'années (~50 ans) et n'ont pas été menées dans les conditions attendues dans les installations de l'INB² Cigéo.

Les systèmes d'étanchéité et de drainage sont composés de plusieurs couches de différents matériaux possédant chacun une fonction propre (mécanique, hydraulique). Dans ces assemblages multicouches, la géomembrane polymère représente le matériau de plus faible perméabilité, qui assure l'étanchéité du système, donc sa fonction hydraulique. Dans le commerce : il existe diverses géomembranes polymères industrielles certifiées Asqual⁵: géomembranes à base de Polyéthylène Haute Densité (PEHD), Polypropylène flexible (PP-F), Ethylène Propylène Diène Monomère (EPDM) et Polychlorure de Vinyle Plastifié (PVC-P). Parmi ces géomembranes, celles en PVC-P sont largement utilisées en géotechnique et en génie civil pour assurer l'étanchéité des infrastructures.

Lorsque ces géomembranes sont placées dans un sol, leur durabilité est influencée par plusieurs facteurs environnementaux, notamment la présence d'oxygène, la température, la quantité d'eau, les caractéristiques physico-chimiques du sol et l'activité des micro-organismes. Ces contraintes environnementales peuvent modifier leurs caractéristiques chimiques, physico-chimiques et altérer leurs propriétés mécaniques et hydrauliques, compromettant ainsi leur fonctionnalité à long terme.

L'objectif des travaux de thèse est d'étudier l'évolution des propriétés des géomembranes industrielles en PVC- P dans les conditions spécifiques des ouvrages de surface de l'INB Cigéo, en se basant sur une approche expérimentale multi-échelle permettant de déterminer les mécanismes de dégradation, leurs cinétiques et leurs impacts sur les performances des géomembranes. Cette étude doit permettre d'identifier des indicateurs de durabilité pertinents et de prédire la durée de vie des géomembranes.

La géologie, la sismicité et la géoprospective

8. Changement de circulation océanique Atlantique dans le passé et dans le futur et impact sur le climat en Europe de l'Ouest

La circulation océanique de retournement Atlantique (AMOC) module et conditionne en grande partie le climat européen et celui du bassin de l'Atlantique Nord par une redistribution de la chaleur accumulée aux Tropiques vers les hautes latitudes.

Des données d'observations et certains modèles numériques d'océan montrent un ralentissement, voire un arrêt complet de l'AMOC dans le futur, en réponse à l'augmentation rapide des gaz à effet de serre. Un tel scénario entraînerait des conséquences potentiellement très larges sur le climat européen, aussi bien en termes de températures que de précipitations. Cependant, les projections des circulations océaniques, obtenues via des modèles numériques, sont assez différentes les unes des autres en termes de structure, d'intensité et de réponses transitoires aux variations des différents forçages. Cet aspect nous encourage à chercher à comprendre les dynamiques de fonctionnement de l'AMOC afin d'anticiper les trajectoires climatiques possibles.

⁵ Association Qualité, qui a notamment pour mission de participer à la promotion de la qualité et à la certification des produits textiles des secteurs de la construction/génie civil (géosynthétiques et textiles techniques du bâtiment)

L'objectif des travaux de thèse sera de réaliser des simulations climatiques prospectives pour les prochains 1 000-10 000 ans, en réponse aux variations de gaz à effet de serre et à la disparition des calottes polaires. Il s'agira ainsi d'étudier les divers modes de fonctionnement de l'AMOC en réponse à des scénarios de forçages (taille des calottes polaires, flux d'eau de fonte, concentration en gaz à effet de serre). L'accent sera mis sur les possibles changements d'AMOC dans le futur et leurs conséquences sur le climat en Europe de l'Ouest, notamment sur le site du futur centre de stockage Cigéo. Pour évaluer la qualité des projections, des simulations climatiques sur des périodes du passé seront d'abord réalisées afin de pouvoir comparer les résultats du modèle aux données d'observation (e.g., $\delta^{13}\text{C}$). La période glaciaire et les climats chauds du passé à forte concentration en dioxyde de carbone seront des cibles idéales pour cette évaluation. Pour réaliser ce travail, le modèle couplé océan – atmosphère IPSL-CM⁶ sera utilisé.

L'environnement et le climat

9. Étude de la dynamique paléo-environnementale du territoire d'implantation du centre de stockage Cigéo

L'impact environnemental de l'implantation d'un projet industriel comme le centre de stockage Cigéo, dont la durée de construction et d'exploitation est évaluée à 150 ans, doit être mis en perspective des évolutions environnementales en lien avec des forçages plus globaux comme le changement climatique ou les évolutions des pratiques humaines (agriculture, sylviculture, développement ou déprise économique).

Dans ce contexte, l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) de l'Andra acquiert, depuis plus de 15 ans, des données de suivi de la qualité des milieux (eaux, sols, air, biodiversité), ainsi que des activités humaines. Les données ainsi collectées visent à améliorer la compréhension des dynamiques globales de l'évolution actuelle des écosystèmes du territoire d'implantation de Cigéo. L'étude des évolutions passées du territoire pourrait venir compléter les données sur l'Actuel pour identifier de nouveaux marqueurs de suivi des évolutions environnementales.

Les travaux de thèse proposés s'inscrivent donc dans le cadre de la recherche en écologie historique et en paléoécologie. Ils visent à identifier et caractériser des marqueurs et indicateurs d'une occupation naturelle ou anthropique (forêts, prairies ou cultures) par l'étude d'archives et d'enregistrements sédimentaires, pédologiques ou archéologiques des paysages du territoire de l'OPE. L'utilisation de mesures isotopiques dans les sols ou l'analyse et la datation de macrorestes végétaux, de pollens ou d'indices d'occupation anthropique (charbons, terrassements, etc.) peuvent être envisagées pour identifier des événements/phases de fermeture du territoire (reforestation) ou, à l'inverse, d'ouverture (défrichement, incendie, expansion agricole, etc.). En ce qui concerne les périodes historiques plus récentes (de l'ordre du dernier millénaire), des archives documentaires (cartes anciennes, registres de martelages, représentations picturales, etc.) et des indices archéologiques peuvent également être utilisés pour compléter les indicateurs pédologiques. L'échelle temporelle étudiée dépend fortement des conditions de conservation des sites investigués mais il est généralement possible de remonter à quelques millénaires, a minima plusieurs siècles.

Le résultat attendu est une description de la ou des trajectoires passées du socio-écosystème à une échelle spatiale adaptée au périmètre d'étude du centre de stockage Cigéo, comprenant les bois de Montiers-sur-Saulx et de l'Ormançon et les vallées de la Saulx, de l'Orge, de l'Ormançon et de l'Ornain. Si les indicateurs identifiés permettent une reconstitution robuste de l'évolution du paysage, il sera alors possible de discuter de l'influence de différents facteurs potentiels comme le climat ou les usages locaux au cours du temps.

Ce travail prospectif viendra ainsi soutenir et compléter les travaux engagés depuis 2019 sur l'évaluation des services écosystémiques rendus par le territoire et permettra de consolider les connaissances sur les déterminants de l'évolution des écosystèmes du territoire et des services qu'ils rendent. Il permettra d'apporter une perspective historique à un futur outil d'évaluation des impacts de l'implantation et de l'exploitation du centre de stockage sur les services écosystémiques rendus par le territoire. Enfin, ce travail de thèse contribuera à esquisser des évolutions futures potentielles pendant la phase de construction mais également selon des scénarios climatiques et socio-économiques présélectionnés.

⁶ Institut Pierre-Simon Laplace – Climate model

10. Interactions lors des étiages entre les paramètres physico-chimiques des cours d'eau intermittents de tête de bassin versant calcaire en contexte de changement climatique

Dans le Grand Est, une tendance à l'augmentation des températures (+0,3°C/10 ans) est observée. Or, des températures plus élevées tendent à augmenter l'évapotranspiration, pouvant se traduire par un allongement de la durée des assecs et des périodes d'étiage. Dans ce contexte de changement climatique, évaluer la capacité des cours d'eau de tête de bassin versant calcaire à maintenir une qualité chimique et écologique compatible avec les usages est un enjeu majeur pour le suivi de l'impact environnemental du centre de stockage Cigéo.

Les paramètres influencés par l'évolution des températures et l'évapotranspiration tels que la température de l'eau, le débit, la hauteur d'eau, les échanges nappe/rivière sont de nature à modifier les concentrations en polluants, nutriments et autres composés issus des activités humaines ou non humaines. En période d'étiage, les évolutions des caractéristiques physico-chimiques peuvent également modifier la capacité de ces cours d'eau à maintenir certaines fonctions écologiques.

L'objectif de ces travaux de thèse combinant hydrogéologie, hydrologie et biogéochimie vise spécifiquement à améliorer la connaissance des relations entre tendances climatiques, débits, qualité de l'eau et capacité des milieux aquatiques à maintenir des services écosystémiques dans le contexte peu étudié des cours d'eau intermittents de tête de bassin versant calcaire.

L'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) de l'Andra dispose d'un jeu de données diversifié et de collectes régulières de données qui présentent une opportunité rare pour mieux comprendre la variation sur le long terme de ce type d'écosystème aquatique. Ainsi, la qualité de l'eau de 22 sites est suivie mensuellement (plus de 300 polluants mesurés). Les espèces indicatrices de la qualité de l'eau (diatomées et macrophytes) et les polluants présents dans les sédiments aquatiques sont également suivis annuellement selon les méthodes de la Directive cadre sur l'eau. Depuis 2011, ce suivi des eaux de surface est complété par 6 stations équipées de capteurs de suivi en continu des niveaux d'eau et de la qualité des eaux.

Les travaux de thèses s'attacheront à effectuer une analyse croisée des tendances présentes dans les données de suivi en continu et les données de suivi ponctuel collectées par l'OPE, afin de :

- (1) réaliser un état des lieux des fréquences d'étiage/d'assec et de leurs tendances à long terme et interannuelles dans la zone d'étude ;
- (2) déterminer dans quelle mesure celles-ci peuvent être expliquées par des tendances climatiques ou être liées à l'usage de l'eau sur le territoire ;
- (3) examiner les tendances à long terme et interannuelles dans les différentes données disponibles sur la physico-chimie des cours d'eau, en particulier en ce qui concerne les températures aquatiques, l'oxygène dissous et les autres paramètres susceptibles d'avoir un impact sur la variabilité observée ;
- (4) interpréter la variation observée en développant des indicateurs de suivi et des tests statistiques reproductibles appropriés pour le suivi long terme des évolutions de la qualité des hydrosystèmes de la zone d'étude pour l'implantation du centre de stockage Cigéo.

L'hydrogéomécanique du Callovo-Oxfordien

11. Développement de nouvelles techniques de caractérisation sur échantillons des propriétés hydromécaniques d'une roche argileuse

La caractérisation des propriétés hydromécaniques du Callovo-Oxfordien sur échantillons est complexe du fait de son comportement intrinsèque anisotrope et de sa très faible perméabilité, de ses capacités de gonflement, du fluage et de la désaturation initiale induite par le prélèvement et la préparation des échantillons. Dans le cadre du développement du centre de stockage Cigéo, de nouvelles campagnes de caractérisation sont prévues, avec la réalisation des premiers forages dans la zone d'implantation de l'INB Cigéo et le développement des ouvrages souterrains, pour confirmer les paramètres hydromécaniques du Callovo-Oxfordien et réduire si possible les incertitudes. Si beaucoup d'essais ont été réalisés dans le passé, le développement de nouveaux protocoles d'essais ou de dispositifs innovants pourrait permettre d'améliorer cette caractérisation au regard de la variabilité minéralogique et de réduire les incertitudes, par exemple en

définissant mieux l'évolution des paramètres sous diverses conditions (température, contrainte moyenne, contrainte déviatorique, degrés de saturation, etc.).

L'objectif des travaux de thèse sera de proposer de nouveaux protocoles d'essais ou des dispositifs de mesure innovants, ainsi que la méthodologie de détermination des paramètres (analytique, modélisation numérique) et des incertitudes associées, pour mieux caractériser les propriétés de base d'une roche argileuse, comme la perméabilité, le fluage et les paramètres poro-élastiques. À titre d'exemple, il pourrait être envisagé de développer la méthode dite « harmonique » pour la mesure de la perméabilité ou de mettre au point des dispositifs permettant de déterminer, sur un même échantillon, des paramètres élastiques statiques et dynamiques et leurs corrélations ou encore d'améliorer les mesures de fluage sous température. De même, utiliser les réseaux de fibres optiques ou d'imagerie *in situ* qui se développent actuellement est une piste d'amélioration pour les mesures de déformation volumique qui pourrait permettre de réduire certaines incertitudes sur la caractérisation et de préciser l'anisotropie du comportement.

12. Modélisation et caractérisation du comportement hydromécanique-gaz des roches argileuses

L'Andra dispose d'un socle de connaissances important sur la modélisation et la caractérisation du comportement de l'argilite du Callovo-Oxfordien, roche hôte du centre de stockage Cigéo, sous sollicitation hydrique et injection au gaz à différentes échelles. Ces connaissances ont été établies à partir des essais sur échantillons de roche prélevés dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et des expérimentations réalisées *in situ*, ainsi que des travaux de modélisation se basant sur des approches en milieux poreux équivalents. L'accroissement de ces connaissances à travers des études expérimentales et numériques permet d'améliorer la maîtrise des processus physiques ayant lieu au long de la vie du centre de stockage Cigéo ainsi que leur intégration dans les travaux de conception, d'optimisation et de sûreté.

L'objectif des travaux de thèse sera de développer et/ou d'améliorer :

- (1) des méthodes numériques afin de déterminer le couplage entre propriétés hydrauliques des argilites du Callovo-Oxfordien et déformation à partir des réseaux poreux issus de la caractérisation par imagerie ;
- (2) des modèles (discrets et/ou milieux continus équivalents) représentatifs des mécanismes d'initiation et de propagation des fractures induites par une sollicitation au gaz, à l'échelle macroscopique, en s'appuyant sur les données expérimentales ;
- (3) des modélisations à l'échelle de l'expérimentation *in situ* et des ouvrages de Cigéo intégrant le phénomène d'autocolmatage ;
- (4) des modèles considérant la re-fermeture des fractures et ses conséquences sur les ouvrages de Cigéo.

Les travaux de thèse viseront à réduire l'incertitude concernant les paramètres hydrauliques du Callovo-Oxfordien (pression d'entrée et de percée au gaz, perméabilité à l'eau, courbe de rétention d'eau, etc.), à renforcer les connaissances sur les mécanismes de migration du gaz dans l'argilite, les mécanismes à l'origine de la transition de la migration à la fracturation au gaz, les mécanismes de propagation des fractures existantes dans la formation du Callovo-Oxfordien dans le contexte du stockage, l'effet de l'autocolmatage et la re-fermeture des fractures autour des ouvrages du centre de stockage Cigéo pendant la phase de fonctionnement et l'après-fermeture.

13. Comportement thermo-hydro-mécanique des roches argileuses en condition non saturée et en présence d'une phase gazeuse sous sollicitation thermique

La mise en place des colis de stockage exothermiques dans les alvéoles mène à une augmentation de la température dans la roche hôte et donc à une surpression essentiellement due à la différence entre le coefficient thermique de l'eau et celui de la matrice squelette. Cette surpression pourrait causer des surendommagements autour des alvéoles de stockage et des endommagements en champ lointain.

L'Andra dispose déjà d'un socle de connaissances important sur le comportement thermo-hydro-mécanique macroscopique sous sollicitation de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien, roche hôte du centre de stockage Cigéo. Ces connaissances ont été établies à partir des essais sur échantillons de roche prélevés dans le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne et des expérimentations réalisées *in situ*, ainsi que d'importants programmes de simulations numériques menés en collaboration avec des partenaires de l'Andra ou à travers des projets internationaux (DECOVALEX, EURAD, etc.).

L'objectif des travaux de thèse sera d'étudier le phénomène de pressurisation thermique des milieux poreux non saturés en présence d'une phase gazeuse afin d'évaluer le risque de surendommagement en champ proche des alvéoles de stockage dû au dégagement de chaleur des colis exothermiques et à la production de gaz. Les résultats des travaux de thèse permettront de consolider les connaissances sur le comportement thermo-hydro-mécanique du Callovo-Oxfordien, en lien avec la réalisation des futurs démonstrateurs d'alvéole HA, et de consolider les hypothèses prises en compte pour la conception et la sûreté.

Les outils de simulation numérique, le digital et l'IA

14. Application de l'intelligence artificielle à la fusion de données d'alvéoles « témoins » aux alvéoles « courants » dans le cadre du quartier pilote HA

Dans le quartier pilote HA du centre de stockage Cigéo, quelques alvéoles dits « témoins » seront fortement instrumentés afin de suivre finement l'évolution dans le temps des processus thermomécaniques caractéristiques de ce composant. Au premier ordre, les alvéoles témoins et courants présentent un comportement similaire, ce qui permet de transposer directement les tendances principales observées sur les alvéoles témoins aux alvéoles courants. Dans cette logique, la majorité des alvéoles, dits « courants », ne disposeront que d'une instrumentation restreinte, limitée à des fibres optiques disposées à l'extrados du chemisage pour le suivi réparti de la température le long de celui-ci et, éventuellement, pour le suivi de la déformation orthoradiale (via quelques sections de fibres enroulées autour du chemisage).

L'objectif des travaux de thèse est d'aller au-delà d'une transposition de premier ordre en raffinant l'estimation de paramètres non mesurés directement sur les alvéoles courants (par exemple les variations de diamètre interne, accessibles uniquement sur les alvéoles témoins par cannes de convergence). Ils viseront à développer une approche de transposition de données fondée sur l'intelligence artificielle analytique et le *soft sensing* (capteur virtuel), afin d'inférer plus finement l'ovalisation des alvéoles courants à partir des mesures des fibres optiques disposées à l'extrados disponibles et des corrélations établies à partir des alvéoles témoins.

Les travaux s'appuieront sur du *machine learning* spatio-temporel formulé dans un cadre bayésien, de manière à représenter explicitement les incertitudes de prédiction et à préserver la cohérence physique des estimations. Plusieurs architectures pourront être évaluées, notamment les modèles variationnels auto-encodeurs (VAE, Kingma et Welling, 2013) pour la représentation latente des relations thermomécaniques et les TSMixers (Chen *et al.*, 2023) pour l'apprentissage et la prédiction à partir des séries temporelles. Des méthodes d'adaptation de domaine (alignement statistique et/ou contrainte physique du latent commun) seront étudiées pour faciliter la généralisation des caractéristiques apprises sur les alvéoles témoins aux alvéoles courants. La méthodologie intégrera une qualification préalable des données instrumentales afin de limiter les biais d'apprentissage. La perte d'information induite par l'instrumentation restreinte sera analysée par décimation virtuelle des capteurs et scénarios de dégradation contrôlée. La robustesse et la capacité de généralisation des modèles seront évaluées par des protocoles de validation croisée inter-sections (sur un même alvéole), inter-alvéoles et inter-phases (par exemple avant et après chauffe), en séparant strictement les données d'apprentissage des données de test afin d'éviter toute fuite d'information lors de la transposition. Une modélisation numérique thermomécanique sera utilisée comme cadre de référence physique, à la fois pour conduire des exercices d'apprentissage et de validation sur données simulées et pour contraindre les modèles d'inférence. En outre, les développements s'appuieront sur des jeux de données réels disposant de mesures directes des grandeurs d'intérêt (cannes de convergence, etc.), utilisées comme références pour comparer systématiquement les estimations inférées aux observations correspondantes et en analyser la robustesse.

Ces travaux contribueront à exploiter pleinement les données disponibles et à affiner l'interprétation des comportements thermomécaniques observés sur les alvéoles courants. Ils pourront également éclairer la conception de futurs plans d'instrumentation. Les développements s'appuieront sur les démonstrateurs instrumentés du Laboratoire de recherche souterrain (notamment les alvéoles chauffants ALC et représentatifs HAR).

15. Approche d'interpolation et de fusion de données 4D multiphysiques fondée sur des graphes relationnels et des mécanismes d'attention (GAT)

La surveillance de systèmes complexes instrumentés, multi-physiques et multi-échelles, tels que les alvéoles HA et MA-VL de Cigéo, requiert des méthodes de traitement de données capables de restituer une information fiable, intégrée et physiquement cohérente dans le temps et l'espace. Ces méthodes doivent notamment permettre de reconstituer des champs thermomécaniques à partir de données partielles et hétérogènes issues de capteurs répartis dans des milieux de nature différente au sein d'un même système (par exemple, un alvéole HA).

Dans ce contexte, l'intérêt des *Graph Attention Networks* (Velickovic *et al.*, 2017) et, plus largement, des modèles relationnels sur graphes pour l'interpolation et la fusion de données 4D multi-paramètres (température, déformation) réside dans leur aptitude à intégrer simultanément : (i) la structure spatiale complexe du système instrumenté, souvent non euclidienne ; (ii) les relations physiques croisées entre grandeurs mesurées ; et (iii) la dynamique temporelle des processus thermomécaniques couplés. En représentant les capteurs comme des nœuds et les interactions physiques comme des arêtes, ces modèles permettent de décrire des systèmes multi-interfaces où des capteurs peuvent être spatialement proches mais faiblement connectés physiquement, selon la nature des matériaux et des interfaces (acier, MREA⁷, air, colis chauffants).

L'objectif des travaux de thèse vise à développer un cadre d'interpolation et de fusion de données capable de représenter cette topologie complexe et ces couplages multi-paramètres et multi-interfaces (intrados, extrados du chemisage, colis chauffants). L'enjeu principal portera sur la projection des données dans un espace relationnel (déterministe ou appris par mécanismes d'attention) reflétant la connectivité physique effective du système, avant interpolation dans ce nouvel espace. Les travaux viseront à articuler explicitement des relations issues de modèles de processus physiques simplifiés avec des relations apprises par des approches relationnelles sur graphes. Les modèles physiques, bien que nécessairement réducteurs, permettront d'établir un socle formel décrivant les interactions attendues entre capteurs, matériaux et interfaces du système instrumenté (intrados et extrados du chemisage, colis chauffants, milieux interfacés), par exemple au travers de relations de diffusion thermique, de continuité ou de transfert mécanique. Ce socle pourra être mobilisé pour structurer a priori la topologie du graphe, définir des connectivités privilégiées, des pondérations initiales ou des contraintes qualitatives, constituant ainsi une base de connaissances physiquement interprétable. Les mécanismes d'apprentissage, notamment par attention, interviendront alors pour ajuster, enrichir ou compléter ces relations lorsque les données l'indiquent, en captant des effets non modélisés, des hétérogénéités locales ou des comportements émergents. Cette approche hybride permettra à la fois de limiter le recours à des relations purement apprises dépourvues d'ancrage physique, d'améliorer l'interprétabilité des modèles relationnels et de disposer d'outils de validation croisée entre relations apprises et relations physiquement attendues, renforçant ainsi la cohérence et la crédibilité des interpolations et fusions de données produites.

Les développements s'appuieront sur l'extension du cadre thermique existant (Hembert *et al.*, 2025) vers la thermomécanique, ainsi que sur la quantification rigoureuse des incertitudes d'estimation, en continuité avec les travaux menés à l'Andra sur les processus gaussiens et la métrologie des capteurs.

⁷ Matériau de remplissage de l'espace annulaire