

THESES ANDRA APPELS A PROJETS 2023

THEMES PROPOSES

Préambule

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

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

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce nouvel appel à projets de thèses Andra 2023, 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.

Géologie – hydrogéologie – transfert de solutés en milieu naturel

1. 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.

Dans le cadre global de la consolidation des connaissances acquises pour le développement du projet Cigéo et plus particulièrement d'une démarche d'évaluation des évolutions temporelles possibles de la sismicité et de l'activité potentielle des failles, de la surpression et de l'état de contraintes *in-situ*, les travaux de thèse viseront à apporter un éclairage sur les variations spatiales de l'état de contraintes de la croûte. Il s'agira 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).

2. Réactivité et transport des formes dissoutes et particulières 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 particulière 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 particulières lors du ruissellement sur les verses ou sur les couvertures argileuses de l'Andra par des approches à la fois expérimentales et de modélisation.

3. Modélisation géologique des encaissants carbonatés de la formation du Callovo-Oxfordien : simulation des faciès et des propriétés pétrophysiques par inversion de données sismiques

L'utilisation de nouvelles méthodes de modélisation des milieux géologiques pourrait permettre, via un habillage des encaissants à partir de données sismiques, d'améliorer le modèle hydrogéologique sur le secteur de Meuse/Haute-Marne ainsi que la représentation géologique des formations encaissantes de la formation du Callovo-Oxfordien (*i.e.* Dogger et Oxfordien calcaire) et de leurs propriétés pétrophysiques et hydrodispersives.

Cette thèse a pour objectif de modéliser les paramètres sédimentologiques et pétrophysiques par l'inversion de données sismiques acquises sur le secteur d'étude de Meuse/Haute-Marne à travers une double approche (caractérisation de l'extension spatiale des différentes formations géologiques grâce aux données diagaphiques telles que faciès, porosité, perméabilité et simulation de la distribution de ces formations grâce aux données provenant du bloc sismique 3D acquis à l'échelle de la Zone d'Implantation des Ouvrages Souterrains) et la mise en œuvre de méthodes adaptées aux différentes lithologies, aux modifications physico-chimiques et à l'hétérogénéité spatiale des environnements de dépôts. La modélisation des faciès et propriétés pétrophysiques en tenant compte de l'extension des paléo environnements, de l'impact des

processus diagénétiques et de la variabilité verticale dans ces encaissants carbonatés constitue la nouveauté et l'intérêt de ce sujet de recherche.

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

4. Effet de la température et de la saturation sur le comportement mécanique du Callovo-Oxfordien

Dans le cadre de l'optimisation des ouvrages souterrains du projet de stockage Cigéo, les gains potentiels futurs résulteront d'une meilleure représentation de l'endommagement diffus du Callovo-Oxfordien et d'une caractérisation plus fine des paramètres thermo-hydro-mécaniques associés.

Des études antérieures ont montré une influence de l'humidité relative sur la résistance en compression supérieure à celle de la température. De plus, les essais de caractérisation effectués sur des échantillons ayant été exposés à de très fortes températures lors des expérimentations CRQ et ALC1605 menées *in-situ* au sein du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne n'indiquent pas ou peu d'altération des propriétés mécaniques. Par ailleurs, les essais de compression sur échantillons chauffés effectués dans le cadre du work package HITEC du programme européen EURAD indiquent une légère baisse de la résistance avec la température. Afin d'accroître la compréhension de l'influence de l'état de saturation sur le comportement des échantillons testés, les travaux de thèse porteront sur l'étude de l'impact de la température sur le comportement hydromécanique du Callovo-Oxfordien.

Radionucléides – Déchets radioactifs

5. Modélisation de la dégradation du PVC

La dégradation progressive des PVC contenus dans certaines familles de déchets MA-VL conduit à la mise en solution de composés organiques pouvant influencer la migration des radionucléides. En situation de stockage, cette dégradation sera pilotée par des phénomènes couplés d'hydrolyse et de radiolyse. Les principaux composés issus des PVC soit par hydrolyse soit par radiolyse ont été identifiés expérimentalement dans le cadre des travaux de thèse de Mathilde Chantreux (comportement du PVC sous irradiation puis lixiviation en eau cimentaire). Toutefois les chemins réactionnels ne sont pas totalement établis et le couplage hydrolyse/radiolyse demeure peu étudié.

Afin de mieux comprendre et prévoir le comportement en stockage du PVC et le relâchement des espèces hydrosolubles, les travaux de thèse viseront à modéliser et à prédire les chemins réactionnels les plus probables de la dégradation et la formation des produits de dégradation en confrontant avec les résultats expérimentaux acquis précédemment (notamment au cours de la thèse de Mathilde Chantreux). Au cours de la thèse, il sera développé et appliqué des méthodes de modélisation (DFT Density Functional Theory par exemple) permettant de représenter l'hydrolyse des matériaux pré-irradié et donc de considérer les effets couplés. Il sera ainsi possible d'évaluer les dégradations préférentielles sur les composés industriels, et de déterminer notamment le composé préférentiellement dégradé (polymère de base ou additifs organiques, tels que les phtalates).

Matériaux et composants ouvrages des stockages

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 nos 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 physico-chimiques contrôlées puis intégrera ou participera à l'intégration de ces résultats dans des modèles transports-réactifs aux échelles de ces essais et expériences.

7. Développement d'une membrane d'imperméabilisation des bétons à longue durée de vie

Dans le cadre des ouvrages de stockage de surface ou des installations de surface de Cigéo, les exigences de durabilité renvoient à une minimisation des échanges avec l'environnement pour limiter les évolutions chimiques et physiques au cours des périodes d'exploitation (de l'ordre de 60 ans pour les ouvrages de stockage de surface et de 120 ans pour les installations de surface de Cigéo). En conditions atmosphériques, ces évolutions sont imposées par des variations thermiques (variations journalières et saisonnières) et hydriques (eaux météoriques) auxquelles il faut associer la présence de CO₂. Les échanges hydriques et la carbonatation atmosphérique peuvent conduire à des dommages physiques en relation avec la corrosion des armatures.

L'imperméabilisation des bétons permet de répondre à cette exigence de durabilité vis-à-vis des échanges hydriques. Il existe des solutions industrielles d'imperméabilisation qui font largement appel à des membranes et des résines organiques. Néanmoins, la durabilité de tels matériaux n'est pas optimisée pour une application dans le contexte des centres de stockage de déchets radioactifs, avec des réparations/remplacements nécessaires à une fréquence décennale. L'objectif de la thèse est donc de développer un revêtement minéral qui présenterait les caractéristiques requises d'imperméabilité à l'eau (revêtement hydrophobe), avec des propriétés maintenues en conditions atmosphériques sur des durées plus importantes que celles constatées aujourd'hui en conditions d'exploitation.

8. Amélioration de la compréhension du comportement hydro-méca-chimique des matériaux des ouvrages de fermeture

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). En après-fermeture, la représentation plus fine du transitoire hydraulique-gaz constitue un enjeu de quantification des marges de conception et de sûreté, d'optimisation de la conception des ouvrages de fermeture et de description fine de leurs performances à long terme.

L'objectif des travaux de thèse est d'améliorer la compréhension des couplages entre les processus chimiques et physiques dans les matériaux de scellements dont la proportion en bentonite est minoritaire (inférieure à 50 %) par rapport à la teneur en sable. Les conséquences de l'évolution chimique des matériaux sur le comportement hydromécanique à long terme et sur les transferts de gaz devront également être évaluées. Il sera attendu a minima des éléments quantitatifs sur le comportement hydromécanique-gaz des matériaux sous perturbation et les paramètres nécessaires à la réalisation de modélisations couplées.

9. 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 de ces ouvrages de fermeture de manière enveloppe et prudente sur la base de modélisations et simulations numériques simplifiées.

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 n'a jamais été réalisée et peu de données sont disponibles sur le comportement cyclique des 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.

10. 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).

11. Identification des conditions extrêmes à l'origine de l'amorçage et de la propagation d'une corrosion localisée d'un acier non allié dans un matériau cimentaire

Dans le contexte du stockage des déchets Haute Activité, les colis de déchets HA sont placés dans des alvéoles constitués d'un chemisage en acier non allié. L'espace annulaire entre la roche et ce chemisage est comblé par un coulis cimentaire spécifique aux besoins du projet et dont plusieurs formulations sont à l'étude (pH, composition...). Dans les conditions du stockage, la cinétique de corrosion généralisée sera très lente (milieu anoxique ou grâce à une passivation de l'acier en présence d'oxygène) et fait déjà l'objet d'études paramétriques.

L'objectif de la thèse est d'identifier les paramètres extrêmes pouvant conduire à une corrosion localisée (amorçage et propagation). Les différents facteurs à prendre en compte pouvant influencer sur ce risque sont essentiellement les paramètres environnementaux (formulation du matériau de remplissage, présence concomitante de l'oxygène et de chlorures, température...). Ce sujet devra être traité expérimentalement en croisant différentes techniques de mesures et d'analyses de surface. Il pourra également s'appuyer sur des modélisations.

12. 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.

Observation-surveillance : dispositifs techniques

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

La maîtrise du fonctionnement phénoménologique de Cigéo reposera notamment sur la comparaison de données de surveillance *in situ* et de simulations prédictives afin de s'assurer de la conformité de l'évolution des composants du stockage (colis, alvéoles) au regard de leurs fonctions en phase d'exploitation et en après fermeture, en incluant l'exigence particulière de récupérabilité des colis. Les fibres optiques distribuées Brillouin/Rayleigh, qui permettent des mesures réparties pour le suivi thermomécanique d'ouvrages de génie civil, font partie des moyens de mesure performants et fiables envisagés pour atteindre cet objectif. Dans ce cadre, plusieurs démonstrateurs d'alvéoles de stockage de déchets de haute activité ont été instrumentés en fibres optiques au Laboratoire Souterrain de Meuse / Haute-Marne. Une grande quantité de données de mesure est ainsi disponible, dont certaines ont déjà été exploitées pour une analyse préliminaire de la convergence d'un tube en acier (appelé chemisage) inséré dans un micro-tunnel, sur la base de méthodes inverse (A. Piccolo, 2020). Plusieurs sujets pourront être proposés pour suivre le comportement des différents composants du stockage.

Un premier axe de recherche porte sur la conversion des signaux optiques bruts de déformation en indicateurs (champ de contrainte, suivi de la géométrie et identification d'endommagements tels que les fissures) pour des ouvrages en béton coulés en place. Des essais pourront être envisagés sur des corps d'épreuve représentatifs en laboratoire (en conditions maîtrisées) et les données issues de fibres optiques installées au Laboratoire de recherche souterrain de l'Andra (en conditions de terrain) seront mises à disposition.

Un deuxième axe de recherche vise à consolider l'analyse du comportement *in-situ* du chemisage y compris sous sollicitation thermique. Le travail de thèse visera à développer les méthodes de traitement et analyse des données de fibres optiques déjà mises en œuvre dans le but (i) d'intégrer l'influence d'un chargement thermique et (ii) d'étudier la faisabilité de caractériser, en plus du changement de forme du chemisage (convergence), le chargement mécanique appliqué par le terrain et son évolution dans le temps. La méthode de traitement pourra s'appuyer sur des résultats de mesures réalisées sur éprouvettes et maquettes soumises à différents cycles de chargement mécanique en laboratoire.

Enfin, un dernier axe de recherche consiste à exploiter les mesures réparties de température disponibles pour caractériser l'écoulement d'un coulis cimentaire injecté entre la roche et le chemisage pour en limiter la corrosion. Il s'agira de proposer une méthode de traitement permettant de visualiser la progression du coulis dans le vide annulaire et ainsi permettre à l'Andra d'optimiser sa méthodologie d'injection.

14. Durcissement d'optiques LIDAR par l'utilisation de matériaux transparents dans l'UV-Visible

Dans le cadre du développement du projet Cigéo, l'Andra étudie des moyens de mesure répartie de la concentration en hydrogène et en oxygène au sein des alvéoles de stockage de déchets de haute-activité et de moyenne activité à vie longue. Les travaux menés ont conduit au développement d'un prototype de LIDAR Raman en collaboration avec l'ONERA (Limery et al., 2017). Cependant, en condition d'utilisation, une fluorescence importante apparaît sur les optiques utilisées. L'état de l'art sur des verres transparents exempts de fluorescence est très limité. On peut citer le spectrosil® utilisé actuellement mais qui reste très influencé par les radiations dans l'UV-visible.

Les travaux de thèse portent sur le durcissement du prototype LIDAR par l'usage de matériaux à la fois transparents dans l'UV-visible et offrant une bonne tolérance vis-à-vis du rayonnement Gamma. Dans le domaine optique d'intérêt, il s'agit d'étudier et de caractériser des matériaux à fort potentiel tels que des céramiques dites transparentes (spinelles ABO_2), des verres ultra-purs ou encore des traitements spécifiques des surfaces des verres. Les travaux de thèse incluront l'intégration de la chaîne optique et photonique (LIDAR, caméra, filtre, lentille).

15. Télécommunication à travers les couches géologiques par ondes sismiques

Cigéo est le projet de centre industriel de stockage de déchets hautement radioactifs à vie longue en couche géologique, conçu pour accueillir les déchets produits par l'ensemble des installations nucléaires françaises actuelles. Le stockage comprend notamment des ouvrages de fermeture et des barrières de confinement à différentes échelles spatiales et temporelles. Dans le cadre du suivi et de la surveillance, un des enjeux concerne l'étude de moyens de télécommunication adaptés aux spécificités du stockage profond, notamment à l'échelle des couches géologiques entre le fond et les installations de surface.

Le travail de thèse portera sur la partie algorithmique de la télétransmission de données par ondes acoustiques acquises dans le cadre du projet SeisCom (porté par l'Andra en collaboration avec la société Smart Seismic Solutions). Les axes de recherche se situent à la frontière des domaines de la géophysique, avec les difficultés i) d'atténuation du signal sur de grandes distances (entre le fond et la surface) et ii) de l'hétérogénéité spatiale et de la variabilité temporelle des milieux en très proche surface (sur les 5 premiers mètres), des télécoms (rapport quantité d'information transmise versus énergie nécessaire, multiplexage, *compressed sensing*) et enfin du traitement du signal (technique d'amélioration du rapport signal/bruit).

Simulation numérique, BIM, IA pour le traitement des données, robotique

16. Coopération multi-robots en environnement dynamique (co-activité) et souterrain

Cigéo est le projet français de centre de stockage profond de déchets radioactifs, conçu pour stocker les déchets hautement radioactifs à vie longue produits par l'ensemble des installations nucléaires actuelles. Pour préparer et accompagner le développement progressif de Cigéo, l'Andra conduit des études d'intégration et de dimensionnement de systèmes robotisés associés à la surveillance des ouvrages, à la maintenance de systèmes et en support aux opérations de creusement. Pour réaliser ces tâches, un des enjeux concerne la capacité des robots à naviguer de manière autonome dans un environnement spécifique (le milieu souterrain) et dynamique (co-activité avec d'autres opérations de chantier).

Les travaux de thèse consistent à étendre les approches classiques (algorithmes de type SLAM : *Simultaneous Localization and Mapping*) à des situations dans lesquelles de multiples robots (de mêmes natures ou de natures différentes) coopèrent à l'exécution d'une ou plusieurs tâches. Les robots doivent coordonner leurs stratégies en fonction de leurs capacités (le vol, la marche) et de leurs autonomies respectives afin d'optimiser l'efficacité de groupe dans la réalisation de différents programmes (réaliser une cartographie, réaliser des mesures, etc.).

17. Physical-Informed Neural Networks (PINN) pour la simulation de problèmes fortement non linéaires en milieu poreux

Le sujet proposé s'inscrit dans le cadre du développement de méthodes et d'outils numériques robustes, efficaces et adaptés à la représentation des multi-couplages, notamment fortement non-linéaires, aux différentes échelles de temps et d'espace. Plus spécifiquement, il s'agit d'implémenter progressivement les techniques d'Intelligence artificielle (IA) dans les simulations numériques, via des algorithmes d'apprentissage adaptés (*machine learning*), pour résoudre des systèmes complexes, mettant en œuvre un nombre important de données (exemple du transport réactif ou des écoulements diphasiques en milieu insaturé). L'enjeu pour l'Andra est d'accroître les capacités de représentation multi-physiques, en support à l'optimisation de la conception et à la sûreté long terme.

L'objectif de la thèse est de mettre en œuvre une méthode d'apprentissage statistique récente et prometteuse reposant sur un réseau de neurones couplé aux équations physico-chimiques du

problème à résoudre. L'utilisation de cette méthode appelée *Physical-Informed Neural Network* est donc d'estimer des solutions à des problèmes fortement non-linéaires le plus précisément possible avec l'aide de la connaissance physique liée aux équations utilisées. En effet, cet apport de connaissance vise à réduire considérablement la base d'apprentissage et à améliorer les estimations réalisées par le réseau de neurones. Les domaines d'application envisagés sont les plus complexes à simuler tels que le transport réactif avec des phénomènes de précipitation et de dissolution d'espèces chimiques ou l'hydraulique insaturée avec la gestion de l'apparition et de la disparition de phases. Le couplage de la méthode mise en œuvre devrait ainsi concerner des codes comme PhreeqC pour la chimie et Tough2-MP pour l'hydraulique.

Environnement

18. Caractérisation des capacités d'autoépuration des cours d'eau intermittents en contexte de changement climatique

Dans le contexte de changement climatique, la question de la qualité et de la quantité d'eau disponible pour l'homme est un enjeu important pour les territoires et notamment pour le territoire d'implantation du projet Cigéo. En effet, ce projet s'inscrit dans un environnement karstique en tête de trois bassins versants, caractérisé par un débit intermittent et de fortes interactions entre eaux de surfaces et eaux souterraines (pertes et sources). La question se pose donc de la capacité de ces milieux à assurer, dans un contexte de changement climatique (stress hydrique et événements extrêmes climatiques), les fonctions d'autoépuration des contaminants provenant de l'usage par l'homme de ce territoire (activités agricoles, sylvicoles et industrielles). La capacité intrinsèque des cours d'eau à purifier l'eau fait partie des services écosystémiques ou des solutions basées sur la nature souvent considérés afin de protéger ou restaurer les milieux aquatiques (Grizzetti et al., 2019). Elle repose notamment sur le rôle des microorganismes et de processus écosystémiques tels que la photosynthèse aquatique, la dégradation de matière organique par respiration, la sorption, la filtration, la sédimentation et ainsi que d'autres réactions chimiques (notamment d'oxydoréduction). Dans les cours d'eaux, les zones où de fortes interactions entre les eaux de surfaces et les eaux souterraines sont présentes jouent en particulier un rôle clef pour ces transformations, car elles sont des sites de mélange d'eau de compositions souvent distinctes (exemple : en nutriment, en oxygène), ce qui favorise les réactions de dégradation ou d'atténuation des concentrations de polluants tel que les nitrates, les métaux ou les molécules organiques (Smith, 2005).

Le travail de thèse consistera à améliorer la compréhension et la représentation des processus d'autoépuration des cours d'eau de la zone d'étude et de proposer une première évaluation des services écosystémiques de régulation de la qualité des eaux. Ce travail s'appuiera en particulier sur les suivis de la qualité biologique et chimique des cours d'eau que mène l'Observatoire pérenne de l'environnement depuis près de 10 ans sur sa zone d'étude.