APPEL A PROJETS DE THESES ANDRA 2019

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

Pour conduire ses travaux de recherche, l'Andra s'appuie depuis plus de 25 ans, sur le tissu national et international des acteurs de la recherche et développement. L'Andra s'est également dotée, depuis plusieurs années, d'outils de recherche en propre : (i) le Laboratoire Souterrain de recherche et l'Observatoire pérenne de l'environnement, en Meuse/Haute-Marne, spécifiquement pour le projet Cigéo, et (ii) des moyens de simulation numérique pour l'ensemble des activités de l'Agence.

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

La poursuite de l'effort de l'Andra en matière de recherche, s'inscrit dans une logique de consolidation des connaissances, de précision, d'optimisation, de prospective et d'innovation ; C'est aussi un moyen garantissant un haut niveau de connaissances et de rigueur scientifiques, en regard de l'exigence d'excellence scientifique de l'Agence pour répondre à ses activités, et vis-à-vis du dialogue avec les parties prenantes. Par ailleurs, en tant qu'établissement public et en charge d'un mission d'intérêt général, l'Andra contribue ainsi à la formation par la recherche en France. C'est dans ce contexte que s'inscrit cet appel à projets de thèses Andra 2019.

Monitoring, traitement, jumeau numérique/digital

1. Méthode d'optimisation des dispositifs de monitoring

La surveillance des stockages en exploitation repose sur l'acquisition de données issues d'un ensemble de capteurs, afin notamment de vérifier que le comportement de ces stockages est conforme à ce qui est attendu. Le placement des capteurs et les méthodes de traitement de données font l'objet d'une attention particulière afin de s'assurer de l'efficience et de la pertinence de la surveillance.

Le travail de thèse portera sur le développement de nouvelles méthodes d'optimisation du placement des capteurs, dans le cadre de la surveillance du comportement mécanique d'ouvrages de stockage souterrains (roche et structure en béton) du projet Cigéo (centre industriel de stockage de déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue en formation géologique argileuse profonde en Meuse/Haute-Marne), suivant des approches inverses permettant de remonter aux paramètres du comportement mécanique (contrainte, déformation…). Les données issues du Laboratoire souterrain de recherche de l'Andra en Meuse/Haute-Marne où le comportement mécanique des ouvrages souterrains est observé de manière intensive et continue depuis plus de 15 ans, seront utilisées pour ce travail de recherche.

2. Moyens électrochimiques pour la mesure continue de la cinétique de corrosion des aciers *in situ*

L'acier est envisagé pour de nombreux composants du projet Cigéo, le centre industriel de stockage de déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue en formation géologique argileuse profonde en Meuse/Haute-Marne. Le suivi de la corrosion, plus particulièrement de la cinétique de corrosion, de certains de ces composants durant la période d'exploitation sera une donnée de la surveillance de Cigéo. Pour ce faire, différents moyens sont d'ores et déjà envisagés et certains sont mis en œuvre dans le Laboratoire souterrain de recherche de l'Andra en Meuse/Haute Marne exploité dans la formation argileuse devant recevoir le projet Cigéo. La mesure électrochimique est envisagée, notamment afin de disposer d'un suivi en continue de la cinétique de corrosion.

Le travail de thèse portera sur la consolidation de l'architecture d'une sonde électrochimique, le développement de méthodes électrochimiques pour interroger la sonde, la réalisation de raccordements pour rendre compte des mesures observées en condition aérobie ou anaérobie, dans les conditions attendues de Cigéo.

3. Techniques de réduction de modèles d'une maquette numérique

Une maquette numérique est actuellement développée dans le cadre de la conception du projet Cigéo, le centre industriel de stockage de déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue en formation géologique argileuse profonde en Meuse/Haute-Marne. Un objectif de l'Andra est de disposer, à terme en particulier pour la réalisation et l'exploitation de Cigéo (si le projet est accepté), d'un jumeau digital capitalisant, fédérant, et exploitant de manière structurée les différentes données espace/temps du comportement de l'installation souterraine de Cigéo dans le cadre de sa surveillance.

Pour ce faire, il est nécessaire de garantir la prise en compte dans le jumeau numérique des bonnes dimensions spatiales du comportement, en regard des différences de représentation spatiales avec la maquette. Plusieurs techniques complémentaires déjà existantes peuvent être envisagées, comme les méthodes d'interpolation et d'extrapolation, ou les surrogate models ; chacune de ces techniques présente des limitations pour garantir le passage de la maquette numérique au jumeau numérique.

Une des voies possibles est l'utilisation de « modèles numériques réduits » qui permettraient, sur la base d'une validation préalable par des modèles de comportement complexes, couplés et fortement non-linéaires, d'évaluer et de reconstituer de manière robuste et fiable, les différents indicateurs des processus, au niveau de détail géométrique pertinent.

Le travail de thèse portera sur l'identification, le développement, le test et l'implémentation d'une ou plusieurs méthodes numériques de réduction de modèle (de type POD ou PGD ou par espace de Krylov), adaptées à la simulation de processus fortement non-linéaires et/ou couplés, et appliquées aux processus d'écoulements diphasiques et compositionnels en milieu poreux, d'évolution hydromécanique des ouvrages.

4. Comportement mécanique d'une structure métallique, couplé à une corrosion généralisée non uniforme

L'acier bas carbone est envisagé pour de nombreux composants de Cigéo, centre industriel (en projet) de stockage de déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue en formation géologique argileuse profonde. Ces composants sont, par exemple, les chemisages des alvéoles de déchets vitrifiées HA et les conteneurs de stockage de ces déchets. Leur corrosion suit un régime de corrosion généralisée. Le dimensionnement prend en compte la possibilité jugée limitée d'une corrosion non uniforme.

Le travail de thèse portera sur l'évaluation du comportement mécanique d'un chemisage, notamment son endommagement (entrée en plasticité et flambement), en considérant une corrosion généralisée non uniforme, en support à l'évaluation des marges de dimensionnement. Il s'agira de représenter explicitement la propagation hétérogène de fronts de corrosion, avec leur caractère aléatoire (spatialement et en termes de cinétique) et se traduisant par l'apparition de motifs périodiques de corrosion.

Le travail de thèse devra comporter un volet expérimental et un volet modélisation visant à coupler l'endommagement par corrosion avec le comportement mécanique. Le volet expérimental du comportement mécanique (notamment la tenue au flambement confiné) devra comporter des essais sur éprouvettes et sur maquettes à échelle réduite.

5. Matériaux composites à matrice non organique pour des structures de soutènement d'ouvrages souterrains

L'acier est envisagé pour de nombreux composants de Cigéo (centre industriel de stockage de déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue en formation géologique argileuse profonde (en projet), comme par exemple les chemisages des alvéoles de déchets vitrifiées HA. La prise en charge des premiers colis de déchets HA les plus exothermiques dans Cigéo à un horizon temporel de 2080, laisse ouvertes des pistes d'optimisation notamment d'accroissement de la robustesse de la démonstration de sûreté.

L'une des pistes identifiées est l'utilisation de matériaux composites à matrice non organique pour le chemisage HA. Ces matériaux devront permettre d'assurer les fonctions du chemisage et notamment (i) la mise en place et la récupérabilité éventuelle des colis de stockage pendant la durée séculaire de réversibilité de Cigéo et (ii) la limitation du chargement mécanique des conteneurs de stockage HA pendant la période minimale d'étanchéité de ces derniers (de l'ordre de 500 ans). Pour ce faire, les matériaux utilisés devront présenter une tenue à la flexion radiale suffisante afin de résister à la pression anisotrope appliquée par le terrain.

Le travail de thèse portera sur l'identification des couples fibres/matrices non organiques envisageables pour la fabrication de tubes de chemisages en composites, puis sur la mise en forme des composites et la caractérisation de leur comportement mécanique, de l'échelle du matériau à une échelle réduite représentative de celle d'un chemisage.

6. Modèle climatique sur le prochain million d'année dans un contexte climatique élargi

L'exercice de géo-prospective BIOCLIM (5th Euratom Framework Programme) a été le travail fondateur de l'évaluation de l'évolution du climat sur le prochain million d'années, qui se base notamment sur une évolution à long terme du carbone anthropique (Archer et al., 1997).

L'évolution des travaux sur l'évolution climatique pour les prochaines centaines d'années, en lien avec les scénarios de durée de la perturbation anthropique conduit à prolonger le travail mené dans le cadre de BIOCLIM, en considérant notamment une situation de fonte substantielle de l'Antarctique (Pollard et DeConto, 2016) afin d'élargir le cadre initial vers des climats de type « Miocène » avec une dynamique de l'Antarctique, voire même « Eocène » sans calotte Antarctique.

Le travail de thèse portera sur la reprise du modèle BIOCLIM et des hypothèses retenues, en prenant en compte (i) la connaissance accrue des mécanismes du cycle du carbone et des calottes de glace, (ii) l'évolution climatique passée, (iii) les progrès accomplis ces dernières années dans la modélisation du climat, et (iv) l'ensemble des données acquises depuis.

7. Méthodes de caractérisation et d'interprétation des propriétés hydrodynamiques de formations calcaires épikarstiques

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

Le travail de thèse portera sur le développement d'un modèle de représentation explicite des écoulements au sein de la formation des Calcaires du Barrois. Sur la base d'une approche méthodologique globale des données de caractérisation géologiques, hydro-géophysiques et hydro-chimiques de la formation des calcaires du Barrois, il s'agira de développer un modèle conceptuel de représentation hydrogéologique et hydrodynamique 3D explicite, couvrant des échelles allant du piézomètre jusqu'à celle d'un secteur d'étude de plusieurs km². Le travail s'appuiera sur le réseau de mesure existant (environ 30 forages instrumentés, 6 stations hydrologiques, stations météorologiques…) mis en place depuis plusieurs années.

8. Devenir des adjuvants au cours de la dégradation des matériaux cimentaires et effets induits sur le comportement des radionucléides

Les matériaux cimentaires sont très largement utilisés pour les différents stockages, qu'il s'agisse des centres de stockage de surface fermés ou actuellement en exploitation pour les déchets de faible et moyenne activité à vie courte, ou du projet cigéo (centre industriel de stockage de déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue dans une formation profonde argileuse en Meuse/Haute-Marne). La mise en œuvre de ces matériaux repose sur l'utilisation d'additifs/adjuvants (teneur inférieure à 5 % de la masse du ciment) constitués de composés organiques (en particulier des polycarboxylates).

De nombreuses études ont été réalisées afin d'évaluer l'effet de ces composés organiques sur le comportement des radionucléides. Elles reposent sur des essais en solution avec des adjuvants industriels mais également sur des matériaux cimentaires adjuvantés et chimiquement sains (présence de portlandite et d'alcalins).

Le travail de thèse portera sur une étude fine des interactions entre ces composés organiques et les radionucléides, en intégrant l'effet de la dégradation des matériaux cimentaires, afin de quantifier les marges disponibles par rapport à la non prise en compte de leur dégradation jugée enveloppe pour la conception et l'évaluation de sûreté. Il s'agira ainsi d'évaluer (i) la dégradation chimique des molécules d'adjuvantation, lors de la dégradation par hydrolyse (couplée ou non à la radiolyse) des matériaux cimentaires, et (ii) les effets de cette dégradation sur le transfert des radionucléides.

Une attention particulière sera portée (i) à la nature des molécules organiques mises en solution pour les différents états de dégradation du matériau cimentaire, (ii) à la cinétique de dégradation/relâchement des molécules organiques, (iii) aux interactions entre les matériaux cimentaires et les molécules issues de la dégradation des adjuvants, et (iv) au pouvoir complexant des molécules ainsi formées au regard de certains radionucléides (Nickel, Lanthanides, Actinides).

9. Origine et persistance du ^{14}C dans les environnements de surface

L'approche d'évaluation « ERICA » (Environmental Risk from Ionising Contaminants : Assessment and management ; www.erica-tool.com) est étudiée pour évaluer l'impact radiologique, notamment du ^{14}C, sur le biote non humain et les écosystèmes. Cette approche implique une vision moins anthropocentrique des transferts de radionucléides dans la biosphère et des simulations de la redistribution des relâchements potentiels au sein des compartiments environnementaux. Dans ce cadre, les concentrations maximales de certains radionucléides dans des compartiments environnementaux clé (eau, sol, sédiments) sont une donnée d'entrée essentielle.

Le ^{14}C est présent dans l'environnement, avec une origine naturelle (rayons cosmiques) et une origine anthropique (essais nucléaires et rejets chroniques ou accidentels des activités nucléaires). Une fraction du ^{14}C est incorporée dans la biosphère et les sols par photosynthèse et biosynthèses microbiennes. En effet, le ^{14}C, composant fondamental des molécules organiques, est un élément fortement impliqué dans les interactions entre la matière organique du sol et de nombreux organismes.

Le travail de thèse portera sur la modélisation de l'accumulation du ^{14}C, sur la base du cycle de la matière organique à long terme en lien avec le fonctionnement des environnements naturels (forêt, zone humide, plaine alluviale …). Il s'appuiera sur les données disponibles dans la littérature ouverte et à l'Andra ; il prendra en compte l'identification et la quantification des processus de transfert avérés du carbone à des interfaces entre une nappe, un sol, la végétation et l'atmosphère, afin d'évaluer le devenir du carbone profond et sa redistribution dans la colonne de sol et la végétation (développement d'un modèle dynamique intégrant explicitement les flux physiques et les réactions de transformation).

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

La simulation des écoulements d'eau et de gaz à l'échelle de grands systèmes (milieu géologique et installations souterraines) fait appel à des modèles complexes par leur non-linéarité, et la taille et les contrastes des paramètres d'écoulement des systèmes. De telles simulations renvoient à une bonne évaluation de l'erreur entre les solutions exactes et celles approchées, et de la localisation des erreurs, en fonction du schéma numérique de résolution et de la discrétisation spatio-temporelle.

Le système d'équations discrétisées des écoulements eau-gaz en milieu poreux conduit à la résolution d'un système linéaire creux, souvent mal conditionné. Cette résolution utilise des solveurs linéaires creux itératifs comme Bi-CGStab, GMRES ou CG préconditionnés : d'une part le choix du pré-conditionneur est difficile à fixer a priori en fonction du problème et d'autre part le pré-conditionneur retenu est toujours établi de manière « globale », pour « toute la durée » de la simulation, ce qui conduit généralement à des temps de calculs longs et avec une précision numérique acceptable mais améliorable.

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

11. Modélisation couplée des écoulements eau-gaz et de la mécanique en milieu poreux argileux fracturé

La description des écoulements eau-gaz dans l'installation souterraine du projet Cigéo (centre industriel de stockage de déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue dans une formation profonde argileuse en Meuse/Haute-Marne) en après fermeture, repose sur le principe de représentation des composants argileux comme des milieux poreux continus équivalents. La zone endommagée de la roche argileuse hôte en champ proche des ouvrages se présente comme un double milieu, avec des fractures et des blocs de roche hôte non endommagée. Ces fractures ont un comportement particulier vis-à-vis des écoulements eau-gaz du fait notamment de la capacité de cicatrisation hydraulique liée à la présence de minéraux argileux gonflants dans la roche hôte. La représentation de cette zone endommagée avec une approche de type « milieu poreux continu équivalent » prend en compte ces caractéristiques de manière prudente afin de ne pas introduire de biais dans la description et la quantification des écoulements d'eau et de gaz.

Le travail de thèse portera sur le développement d'un modèle de représentation des écoulements de l'eau et du gaz de la zone endommagée, intégrant une représentation explicite du réseau de fractures de cette dernière, afin de rendre compte du double milieu poreux à l'eau et au gaz. Ce modèle sera implanté dans un code de calcul permettant de mener des simulations 3D à l'échelle des ouvrages souterrains du projet Cigéo.

12. Modélisation explicite du comportement mécanique d'un milieu poreux argileux fracturé face à une sollicitation de gaz

La description du comportement mécanique de l'installation souterraine du projet Cigéo (centre industriel de stockage de déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue dans une formation profonde argileuse en Meuse/Haute-Marne) en après fermeture, repose sur le principe de représentation des composants argileux comme des milieux poreux continus équivalents. La zone endommagée de la roche argileuse hôte en champ proche des ouvrages se présente comme un double milieu, avec des fractures et des blocs de roche hôte non endommagée. Ces fractures ont un comportement mécanique particulier en non saturé et saturé du fait de la capacité de cicatrisation hydraulique liée à la présence de minéraux argileux gonflants dans la roche hôte. La représentation du comportement mécanique en non saturé et face à une sollicitation de gaz de cette zone endommagée avec une approche de type « milieu poreux continu équivalent » prend en compte ces caractéristiques de manière prudente afin de ne pas introduire de biais dans la description et la quantification des écoulements d'eau et de gaz.

Le travail de thèse portera sur le développement d'un modèle de représentation du comportement mécanique de la zone endommagée, intégrant une représentation explicite du réseau de fractures de cette dernière, afin de rendre compte du double milieu poreux à l'eau et au gaz, face à une sollicitation de gaz. Ce modèle sera implanté dans un code de calcul permettant de mener des simulations 3D à l'échelle des ouvrages souterrains du projet Cigéo.

Environnement

13. Indicateurs et/ou méthodes de traitement des données environnementales pour l'évaluation de l'évolution des services écosystémiques d'un territoire dans le temps

La durée centennale d'exploitation du projet Cigéo (centre industriel de stockage de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue en formation géologique profonde (en projet)), s'il est autorisé, offre une opportunité unique d'étudier, au-delà de sa surveillance réglementaire, l'évolution des services écosystémiques de son territoire d'accueil, quelles qu'en soient les causes.

Le travail de thèse portera sur la définition, la caractérisation et la quantification des évolutions environnementales passées et présentes d'un territoire rural, sur lequel viendrait notamment s'implanter un projet industriel d'envergure sur le long terme (100 à 150 ans). Des outils de suivi dans le temps des services écosystémiques (indicateurs, cartographie, chroniques…) seront recherchés, dans le but d'alimenter les réflexions sur le rôle de l'environnement et de la réglementation environnementale dans le développement des zones rurales, dans les contextes globaux de changement climatique, d'urbanisation et d'évolution de la perception de l'environnement et de sa qualité. Les observations environnementales réalisées depuis 2007 au sein de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement mis en place par l'Andra (Ope http://ope.andra.fr) pourront, entre autres, être utilisées. A titre de comparaison, d'autres territoires, impactés ou non par des développements industriels, pourront être étudiés.

A titre d'exemples, ce travail de thèse pourra porter sur :

- La définition des services écosystémiques ou bouquets de services adaptés au territoire d'implantation du projet Cigéo ;
- Le développement ou la caractérisation des indicateurs pertinents de l'évolution environnementale ;
- Le développement d'outils de traitement et de valorisation des données et des connaissances acquises.