

APPEL A PROJETS DE THESES ANDRA 2018

L'Andra a acquis, pendant 25 années, de très nombreuses connaissances scientifiques et techniques répondant aux besoins de conception, d'exploitation, d'évaluation de sûreté et de surveillance des stockages de déchets radioactifs tant 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 (FMA-VC) et les déchets de très faible activité (TFA)) que pour les projets de stockage (Centre industriel de stockage géologique (Cigéo) des déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) dans la formation du Callovo-Oxfordien en Meuse/Haute Marne, et projet de stockage à faible profondeur des déchets de faible et moyenne activité à vie longue (FA-VL)).

Fort de ces acquis, l'Andra maintient actuellement une R&D dans une logique de consolidation des connaissances, de précision, d'optimisation et d'innovation. C'est dans ce contexte que s'inscrit cet appel à projets de thèses Andra 2018.

Radionucléides, Déchets

1. Le devenir des adjuvants au cours de la dégradation des matériaux cimentaires et les effets induits sur le comportement des radionucléides

Les matériaux cimentaires pour les stockages sont/seront élaborés avec des additifs/adjuvants (teneur inférieure à 5 % de la masse en ciment), nécessaires pour garantir leur performance, notamment en termes de maniabilité. Les adjuvants actuellement utilisés dans les ouvrages à base de béton, sont constitués de composés organiques (en particulier des polycarboxylates).

L'effet des adjuvants sur le comportement des radionucléides a été évalué à partir d'essais en solution avec des adjuvants industriels mais également sur des matériaux cimentaires adjuvantés et chimiquement sains (présence de portlandite et d'alcalins). Les matériaux cimentaires sains adjuvantés sont considérés comme enveloppe des matériaux cimentaires dégradés associés avec dégradation des adjuvants.

Afin de quantifier les marges, ce travail de thèse porte sur (i) l'évaluation de la dégradation chimique des molécules d'adjuvantation, lors de la dégradation par hydrolyse (couplée ou non à la radiolyse) des matériaux cimentaires, et (ii) l'évaluation des 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, (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.

Matériaux naturels et composants ouvragés

2. Caractérisation des produits de dégradation des espèces hydrosolubles issues de la dégradation du PVC présent dans les stockages

Des matériaux polymères peuvent être présents au sein d'un stockage sous différentes formes : joints, capteurs, câbles, additifs dans les colis de stockage, déchets... En situation de stockage, ces matériaux se dégraderont progressivement sous différents effets (eau, température...) conduisant au relâchement d'espèces hydrosolubles dont certaines pourraient interagir avec les matériaux du stockage et les radionucléides.

Des études menées par le passé sur la radiolyse et l'hydrolyse des polymères, notamment le PVC, ont permis d'identifier certains produits de dégradation de faibles masses molaires. Les solutions issues de la dégradation du PVC ont un pouvoir complexant important vis-à-vis des radionucléides (équivalent à celui de l'ISA considéré comme enveloppe) pour de fortes concentrations en carbone.

Ce travail de thèse porte sur une identification approfondie des produits de dégradation des matériaux à base de PVC, afin s'assurer du caractère enveloppe de ceux identifiés à ce stade.

3. Influence de (très) faibles traces d'H₂S sur la corrosion des aciers non alliés en situation de stockage

L' H_2S possède la propriété très particulière de favoriser la pénétration dans les aciers, de l'hydrogène issu du processus de corrosion. Une fois absorbé dans l'acier, l'hydrogène contribue à en modifier les propriétés mécaniques. Cette problématique est bien connue dans les domaines pétroliers et gaziers. Dans le stockage profond (projet Cigéo), les concentrations attendues en H_2S sont (très) faibles, et par ailleurs, les nuances d'aciers retenues pour les composants métalliques du stockage visent à limiter l'influence de la fragilisation par l'hydrogène.

Ce travail de thèse porte sur l'étude de l'influence de l' H_2S en (très) faibles concentrations sur les différents processus de corrosion des aciers retenus pour le stockage profond (corrosion sous contrainte, corrosion localisée, fragilisation par l'hydrogène et corrosion généralisée) afin de s'assurer de l'absence d'effet significatif de l' H_2S sur les aciers du stockage.

4. Développement de revêtements bi-matériaux innovants pour le stockage profond alliant protection sacrificielle et barrière isolante électrique

Des revêtements anticorrosion pour les composants métalliques du stockage profond (conteneurs de stockage en particulier) sont aujourd'hui étudiés par l'Andra. Parmi les solutions disponibles, deux apparaissent particulièrement adaptées :

- un revêtement de surface sacrificiel (des études antérieures ont montré l'efficacité de revêtements d'alliage zinc/aluminium comme anode sacrificielle et ce, même dans les conditions du stockage géologique jusqu'à 80°C ;
- le dépôt d'une barrière isolante électrique type céramique.

Chacune de ces solutions offre des avantages mais présente aussi des limites en regard des conditions d'utilisation : (i) les dépôts céramiques doivent présenter une étanchéité parfaite tout au long de la période de protection pour ne pas développer une corrosion équivalente à une corrosion sous peinture ; (ii) l'utilisation d'une couche sacrificielle nécessite un dépôt d'une épaisseur suffisante pour garantir la protection du conteneur de stockage pendant toute la période oxydante.

Une voie d'innovation potentielle concernant ces dépôts, serait le développement de matériaux bi-couches/multicouches alliant un matériau isolant électrique protecteur « oxyde » et une couche sacrificielle. La couche « oxyde » du dépôt agirait comme protection de la couche sacrificielle, pendant la période oxydante en situation de stockage. En cas de rupture de la couche « oxyde », la couche sacrificielle prendrait le relai de la protection anticorrosion.

Ce travail de thèse porte sur l'optimisation des technologies de mise en œuvre des dépôts et sur le dimensionnement des différentes couches, pour assurer la protection des composants métalliques dans les conditions du stockage. Ces travaux seront complétés par des expériences d'électrochimie pour caractériser le comportement des dépôts et du substrat (couplage galvanique, vitesse de corrosion, produits de corrosion...).

Comportement thermo-hydro-mécanique-gaz des ouvrages souterrains et du milieu géologique environnant

5. Modélisation du comportement différé de la zone endommagée autour des ouvrages dans le Callovo-Oxfordien suivant une approche de milieu fracturé

Les creusements des ouvrages dans les argilites du Callovo-Oxfordien, roche hôte retenue pour le stockage profond (projet Cigéo), induisent une zone endommagée en champ proche des ouvrages, sous forme de réseaux de fractures. L'extension et l'orientation de ces réseaux de fractures dépendent de plusieurs paramètres tels que l'orientation de l'ouvrage par rapport à l'état des contraintes *in situ*, les paramètres mécaniques de la roche et leurs anisotropies, la durée de mise en place du soutènement.

Le comportement différé et les caractéristiques mécaniques de la zone endommagée conditionnent l'amplitude des charges transmises au soutènement et au revêtement de l'ouvrage au cours du temps. Jusqu'à présent, le comportement mécanique de cette zone est représenté par principe, comme celui d'un milieu poreux continu homogène. Dans le cadre du dimensionnement des ouvrages souterrains de Cigéo, les modèles (hydro)mécaniques ainsi développées sont jugés enveloppes d'une représentation explicite des fractures, en regard notamment des données expérimentales acquises *in situ*.

Ce travail de thèse porte sur la mise en œuvre de nouveaux développements théoriques, expérimentaux et numériques, pour représenter explicitement les fractures et « habiller » la zone endommagée en comportement (hydro)mécanique différé. Une attention particulière sera portée aux différents mécanismes identifiés comme susceptibles de contrôler ce comportement : le fluage de la matrice argileuse ou des fractures, le gonflement des argilites, les couplages hydromécaniques, le déplacement relatif des blocs délimités par les fractures les uns par rapport aux autres.

Simulation numérique

6. Simulation numérique des écoulements dans les réseaux karstiques

La formation des calcaires du Barrois sur le site du projet Cigéo est de type karstique localement. Elle est caractérisée par des matrices rocheuses calcaires (fracturées et saines), des cavités et des conduits de tailles très variables (quelques centimètres à plusieurs mètres), qui ont des comportements hydrologiques et hydrogéologiques singuliers par rapport aux aquifères des formations détritiques (sables, grès, conglomérats, alluvions...).

Les études d'implantation des installations de surface et des liaisons surface-fond de Cigéo visent à éviter les zones karstiques, voire à les traiter, suivant une approche classique et robuste. Les modélisations hydrogéologiques, mises en œuvre jusqu'à présent en appui, ont été réalisées en considérant un seul milieu poreux continu équivalent, avec des écoulements de type Darcy, approche jugée robuste.

Ce travail de thèse a pour objectif d'améliorer les conceptualisations phénoménologique et numérique des écoulements et du transport de solutés dans l'aquifère karstique des calcaires du Barrois, en prenant en compte explicitement les écoulements turbulents/laminaires dans les conduits karstiques et les interactions hydraulique et massique avec l'aquifère à matrice calcaire. La robustesse de tels modèles repose sur les définitions des couplages et sur les approches numériques associées. Le modèle et l'outil de calcul résultant des travaux de recherche seront validés sur des modèles génériques et qualifiés sur un aquifère karstique suffisamment caractérisé.

7. Estimations d'erreur a posteriori et contrôle d'erreur pour la simulation numérique de l'écoulement diphasique eau liquide-gaz dans les stockages

Les simulations numériques menées pour quantifier les écoulements d'eau et de gaz dans les stockages font appel à des modèles complexes par leur non-linéarité, la taille des systèmes à représenter et les contrastes de paramètres hydro-dispersifs. Pour de tels problèmes, la question se pose de l'erreur entre les solutions exactes et approchées, et de la localisation de l'erreur, en fonction du schéma numérique de résolution et de la discrétisation spatio-temporelle.

La théorie des estimations d'erreur *a posteriori* permet déjà de donner des réponses et donc de définir une stratégie permettant d'améliorer la qualité des résultats. Un cadre unifié pour les estimations *a posteriori* des problèmes linéaires a déjà été développé, qui permet non seulement de contrôler l'erreur totale mais aussi d'en distinguer ses différentes composantes, en termes de discrétisation spatiale, temporelle, et de précision du solveur.

L'objectif de ce travail de thèse est d'étendre les formulations d'estimation *a posteriori* et de contrôle d'erreur, couplées à l'adaptation de maillage, à la problématique des écoulements diphasiques eau multi-composants gaz en milieu poreux, avec une gestion de fortes non-linéarités.

Knowledge management

8. Capitalisation de la connaissance implicite et tacite d'un centre de stockage de déchets radioactifs et apprentissage organisationnel

Premier centre français de stockage de déchets radioactifs, le centre de stockage de la Manche (CSM) a été exploité de 1969 à 1994, année de réception du dernier colis. 527 225 m³ de déchets radioactifs de faible et moyenne activité y ont été stockés. L'expérience acquise au CSM pendant les 25 années d'exploitation a été mise au service du centre de stockage de l'Aube, qui a depuis pris son relais. Depuis 2003, le CSM est entré dans une phase de fermeture (durée prévue de l'ordre de quelques décennies) qui sera suivie par une phase de surveillance (durée prévue de l'ordre de 300 ans). Au-delà, la présence de l'exploitant sur le site ne devrait plus être nécessaire. La principale activité du CSM consiste aujourd'hui à contrôler que l'impact du stockage sur l'environnement reste très faible, et à conserver et transmettre les principales données sur le stockage.¹

Obligation réglementaire pour l'Andra, la préservation de la mémoire de ses centres de stockage repose notamment sur des dispositifs dits « passifs », en particulier sur un dossier détaillé de mémoire à destination de l'exploitant industriel du centre pour interpréter les résultats des observations de surveillance et pour guider les éventuelles opérations correctives, et sur une synthèse de ce dossier (« dossier synthétique de mémoire ») à destination des générations futures pour les informer des risques qui pourraient perdurer après le départ de l'exploitant.² L'Autorité de Sûreté Nucléaire s'est prononcée en 2010 sur le rapport de sûreté du CSM présenté par l'Andra et a formulé des recommandations relatives à la complétude et à la cohérence du contenu des archives, à la pertinence des données et des critères de sélection dans la mémoire détaillée ainsi qu'au développement du contenu de la mémoire de synthèse.³

Afin de compléter les actions déjà menées pour répondre à ces recommandations, ce travail de thèse porte sur la capitalisation de la connaissance implicite et tacite. Il s'agira notamment d'instrumenter le management de l'ignorance organisationnelle et la transformation de savoir individuel, intimement lié à la pratique, en connaissance partagée dirigée vers la reproductibilité, la complémentarité, l'apprentissage collectif et l'amélioration dans le temps. L'approche pourra se fonder notamment sur les développements théoriques de la gestion des connaissances, de la cognition distribuée et de l'étude de la complexité, ainsi que sur le retour d'expérience de la mise en œuvre par d'autres organismes des méthodes existantes. Plus particulièrement, le travail de thèse s'attachera à (i) définir une méthodologie de capitalisation de la connaissance implicite et tacite axée sur l'apprentissage organisationnel pouvant être appliquée par l'Andra, (ii) identifier et capitaliser la connaissance implicite et tacite acquise sur le CSM, pertinente pour être réutilisée par d'autres activités de l'Andra, ainsi que celle pertinente pour compléter les archives et pour enrichir la mémoire du Centre.

¹ <http://www.andra.fr/andra-manche/>

² <http://www.andra.fr/pages/fr/menu1/les-solutions-de-gestion/se-souvenir-19.html>

³ http://www.andra.fr/index.php?art=5341&id=actualite_3_3_1

Les porteurs de la connaissance concernée sont les acteurs du CSM, en priorité le personnel de l'Agence, actuel et ancien, mais aussi les partenaires et riverains industriels du Centre, notamment pour leur connaissance relative à son environnement. La connaissance concernée est celle relative à toutes les phases de vie d'un centre de stockage de déchets radioactifs et traite notamment du cadre réglementaire, de l'organisation administrative, des caractéristiques du site et de son environnement, de la conception, de la construction, du fonctionnement et de l'évolution du stockage dans le temps, des déchets stockés et de leur comportement dans le temps et de la surveillance de l'impact du stockage sur son environnement.