

La R&D conduite par l'Andra répond aux besoins de caractérisation, de conception, 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)).

Les travaux de R&D sont conduits tout au long de la vie des stockages 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, permet ainsi en continu leur optimisation, et l'intégration des progrès de connaissances.

La R&D des stockages concerne l'ensemble de leurs composants (radionucléides, déchets, matériaux/composants ouvragés au sens large, milieu géologique, environnement de surface) ; elle couvre un large spectre de domaines scientifiques et technologiques (sciences de la terre, sciences des matériaux, sciences de l'environnement, mathématiques appliquées, informatique, monitoring, sciences et techniques de l'information et de la communication, sciences humaines et sociales...) et de disciplines scientifiques (hydraulique, mécanique, thermique, chimie ...).

Dans une exigence d'excellence des bases scientifiques et technologiques sur lesquelles l'Andra fonde ses activités, l'Agence s'appuie sur le tissu national et international des acteurs de la recherche et du développement. L'Andra s'est par ailleurs dotée, depuis plusieurs années, d'outils de recherche en propre : le Laboratoire Souterrain de recherche (LS) et l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) en Meuse/Haute-Marne, spécifiquement pour le projet Cigéo, et des moyens de simulation numérique pour l'ensemble des activités de l'Agence.

Élément de la politique scientifique de l'Andra en termes d'excellence scientifique mais aussi de contribution à formation par la recherche, les thèses Andra permettent à des jeunes chercheurs d'être au cœur des activités de recherche de l'Agence. Les thèmes de thèses proposés cette année couvrent un large spectre de domaines, en lien avec le développement des composants des projets de stockage, plus particulièrement le projet Cigéo dans la perspective de sa demande d'autorisation de création à l'horizon 2018 et de son instruction. Si des thèmes répondent à des besoins de consolidation et d'approfondissement des connaissances, d'autres s'inscrivent résolument dans une démarche prospective et innovante.

Radionucléides, Déchets

1. Description quantitative et modélisation du cycle biogéochimique des radionucléides ^{36}Cl , ^{79}Se et/ou ^{129}I dans des environnements de surface contrastés

Le ^{36}Cl , le ^{79}Se et l' ^{129}I sont des radionucléides potentiellement importants pour la sûreté après fermeture d'un stockage, de par leur mobilité et leurs longues périodes. La complexité de la biogéochimie de ces éléments dans les milieux naturels de surface, plus particulièrement les sols, résulte notamment de l'action d'un cycle organique important impliquant des processus naturels de transformation liés à la dégradation de la matière organique. Dans une logique prudente, le transfert de ces radioéléments à la biosphère est représenté de manière enveloppe.

Le travail de thèse portera sur l'amélioration de la représentation des modèles de transfert dans des biosphères contrastées (climats froids et chauds), sur la base de la connaissance des stocks et des flux avérés des isotopes stables des radionucléides d'intérêt, en incluant leur spéciation. Ce travail devra s'articuler autour de la caractérisation des différents pools (inorganique vs. organique) influençant l'accumulation du ^{36}Cl , du ^{79}Se et/ou de l' ^{129}I dans les sols, de la quantification du temps de résidence associé, et de la représentation du cycle dans un modèle dynamique. Il s'appuiera sur une analyse préalable des sols d'intérêt pour l'Andra ou permettant une approche globale pertinente pour les besoins de l'Andra.

Matériaux naturels et composants ouvrages

2. Représentation de l'évolution chimique des bétons bas pH en conditions du stockage (projet de stockage Cigéo)

Afin de limiter l'interaction chimique avec les milieux argileux (formation argileuse hôte du Callovo-Oxfordien – argilites – , remblai à base d'argilites excavées, noyau de scellement en bentonite), les bétons bas pH sont envisagés dans les zones de scellement des installations fond de Cigéo. Un ensemble de travaux ont déjà été menés sur les interactions chimiques entre les bétons bas pH et les argilites du Callovo-Oxfordien, notamment sur des pâtes de ciment, afin de fixer un cadre enveloppe à l'évaluation d'une part de leur dégradation chimique et d'autre part de la perturbation chimique sur les argilites.

Le travail de thèse portera sur la consolidation des données acquises et plus particulièrement sur la modélisation mécanistique des processus d'évolution chimique des bétons bas pH retenus actuellement par l'Andra, en situation de stockage. On s'intéressera ainsi aux processus d'hydrolyse, d'attaque sulfatique et de carbonatation sous eau par les argilites, pris notamment de manière couplées, au travers des transformations minéralogiques induites et en lien avec les transformations microstructurales et l'évolution des propriétés de transfert des bétons. Le travail devra traiter des conditions chimiques des argilites saines (conditions redox réductrices) et des argilites oxydées.

3. Modélisation des mécanismes du maintien d'une corrosion active des aciers bas carbone sous dépôts de produits de corrosion en milieu argileux (projet de stockage Cigéo)

Des conditions particulières de corrosion des aciers bas carbone en milieu argileux en situation de stockage peuvent conduire à la formation de produits de corrosion « non protecteurs », maintenant le métal dans un domaine de corrosion active (solubilisation importante de fer entre le métal et un dépôt ferreux ou non, avec formation d'un composé chloré à cette interface). Par conception, ces situations particulières sont évitées afin de garantir les fonctions des composants en acier afférents.

Afin de consolider les dispositions de conception retenues par l'Andra, le travail de thèse portera sur la représentation de la genèse et la nature des mécanismes de corrosion et d'interaction avec l'environnement argileux permettant d'obtenir ce type de système de corrosion « non protecteur », et sur la description de leur évolution dans le temps en regard des conditions de stockage aux limites. Ce travail sera essentiellement expérimental, alliant des techniques d'analyse physico-chimiques

permettant de caractériser des épaisseurs micrométriques à sub-micrométriques de produit de corrosion, à des techniques de mesures électrochimiques.

4. Caractérisation de l'influence de la teneur en oxygène dans une phase gazeuse en équilibre avec un milieu aqueux, sur la corrosion des aciers bas carbone (projet de stockage Cigéo)

En l'état des choix de conception, lors de la période d'exploitation de Cigéo, les composants en acier bas carbone des alvéoles de déchets vitrifiés (HA) seront au contact d'un matériau de remplissage cimentaire (chemisage) ou d'un environnement mixte, présence d'eau et atmosphère humide (intrados du chemisage et conteneur de stockage). En condition d'alvéole fermée, la teneur en oxygène à l'intérieur de l'alvéole diminuera dans le temps, notamment par corrosion et/ou oxydation de la roche hôte en champ proche. L'Andra a déjà mené un ensemble de travaux concernant la corrosion sur des systèmes distincts, milieu aqueux ou milieu atmosphérique, condition anoxique ou aérée, permettant d'évaluer de manière enveloppe la durabilité des composants en acier bas carbone en regard de leurs fonctions dans le stockage.

Afin de consolider les connaissances existantes et d'évaluer de manière détaillée les marges de conception, le travail de thèse consistera à identifier les processus de corrosion dans un système transitoire d'appauvrissement en oxygène et les cinétiques de corrosion associées. Dans ce cadre, on s'intéressera également à des cycles de périodes avec des teneurs en oxygène différentes (appauvrissement suivi d'un enrichissement). Par ailleurs, l'influence d'autres gaz potentiellement présents avec des teneurs plus faibles (CO_2 , H_2S ...) pourra être considérée.

5. Optimisation de la mise en œuvre de revêtements sacrificiels à base de Zn, Al ou leurs alliages pour la protection d'acier bas carbone contre la corrosion (projet de stockage Cigéo)

Les aciers non ou faiblement alliés sont retenus par l'Andra comme matériau de chemisage des alvéoles des colis de déchets vitrifiés (HA) et de sur-conteneur de ces derniers. Le sur-conteneur a pour fonction principale d'empêcher l'arrivée d'eau sur les déchets vitrifiés tant que la radioactivité n'a pas suffisamment décru, soit une durée de l'ordre de plusieurs centaines d'années au maximum pluriséculaire en l'état de la conception. Les colis de stockage HA seront soumis dans les alvéoles de stockage, après quelques années au maximum, à un milieu anoxique, après avoir rencontré initialement des conditions transitoires (milieu oxydant et/ou acides notamment). La conception de ces composants métalliques prend en compte ces différentes conditions.

Dans une logique d'optimisation, notamment en terme de robustesse vis-à-vis des effets des transitoires chimiques sur la corrosion, un revêtement de surface sacrificiel des sur-conteneurs et/ou de tout ou partie du chemisage peut être envisagé. Des études antérieures menés par l'Andra ont montré l'efficacité de revêtements d'alliage Zn/Al comme anode sacrificielle et ce, jusqu'à 80°C. Elles ont également montré l'importance des différentes propriétés physico-chimiques des revêtements (adhérence, homogénéité, compacité, structure métallurgique...). Le travail de thèse portera sur les paramètres de mise en œuvre des revêtements par les différentes techniques de traitement de surface retenues, nécessaires pour assurer la formation de dépôts homogènes et reproductibles, réalisables industriellement. Ces dépôts devront ensuite être testés en corrosion afin d'identifier leur comportement électrochimique et de vérifier qu'ils assurent leur rôle de revêtement sacrificiel.

6. Développement de matériaux composites à matrice minérale pour les chemisages des alvéoles de déchets vitrifiés (projet de stockage Cigéo)

Dans une logique d'optimisation à moyen et long termes de la conception des alvéoles de stockage de déchets vitrifiés (HA) et d'accroissement de la robustesse du stockage, l'utilisation de matériaux alternatifs (« inertes ») aux aciers bas carbone est envisagée. Il pourrait s'agir notamment de géopolymères, matériaux innovants qui ouvrent la voie à la réalisation de nouveaux composites à matrice non organique.

Le travail de thèse, à caractère exploratoire, portera dans un premier temps sur l'identification des couples fibres/matrices non organiques qui pourraient permettre d'envisager la fabrication des tubes de chemisages en composites, en lien avec les conditions d'environnement en situations de stockage, et dans un second temps, sur la mise en forme de ces nouveaux composites et leur

caractérisation physico-chimique et mécanique, avant si possible une étape de changement d'échelle et des tests de fabrication de corps d'épreuve.

7. Caractérisation des propriétés mécaniques à moyen et long termes de matériaux de remblai à base d'argilites excavées (projet de stockage Cigéo)

Les galeries de liaison et les alvéoles de déchets MA-VL seront fermés par des scellements à base d'argile afin d'obtenir une perméabilité suffisamment faible pour contribuer à limiter les écoulements d'eau au sein du stockage en « après fermeture ». Dans ce contexte, l'Andra envisage plusieurs options d'argile, notamment les argiles gonflantes pour lesquelles de très nombreuses études (cf. démonstrateur de scellement à base de pellets de bentonite) ont déjà été menées par l'Andra et ses homologues, mais aussi les argilites excavées seules ou mélangées à de l'argile gonflante. Les performances du matériau de scellement à base d'argilites (perméabilité à l'eau et au gaz, capacité de gonflement, comportement hydromécanique...) dépendront de ses caractéristiques (granulométrie, nature et teneur en bentonite du mélange, teneur en eau initiale...) en lien étroit avec la(es) technique(s) de mise en forme et de mise en place pertinentes dans les conditions du stockage, notamment en terme de maîtrise des caractéristiques hydraulique et hydromécanique du scellement en place.

Le travail de thèse portera sur une exploration du domaine des caractéristiques hydraulique et hydromécanique (gonflement, tassement, fluage...) des mélanges argilites (majoritaires)/argile gonflante (minoritaire), en cohérence avec les techniques de mise en forme et les techniques de mise en place pertinentes dans les conditions de stockage (damage classique, pellets...). Une analyse critique préalable des techniques de mise en forme et de mise en œuvre suivant une grille multicritère devra être menée en lien avec l'Andra (critère technico-économique, simplicité et/ou robustesse de la mise en forme et de la mise en œuvre, performances hydraulique et hydromécanique attendues du matériau, maîtrise de ces performances à la mise en place...), afin de définir une ou plusieurs techniques de mise en forme à explorer. Sur la base d'un plan d'expérience pertinent, le domaine de caractéristiques hydraulique et hydromécanique des mélanges sera alors exploré. On s'intéressera tout particulièrement à la perméabilité à l'eau à saturation et à la capacité de gonflement (potentiel et pression) en lien avec la densité sèche et la teneur en eau à la mise en place.

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

8. Modélisation par « approche discrète » des transferts eau/gaz dans la zone endommagée (argilites fracturées) autour des ouvrages souterrains (projet de stockage Cigéo)

L'excavation des ouvrages souterrains dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien induit à leur pourtour immédiat, la formation d'une zone endommagée composée de fractures plus ou moins interconnectées. L'Andra a déjà mené un important travail de caractérisation des propriétés d'écoulement de l'eau et des gaz de cette zone endommagée, au travers d'essais *in situ* autour des galeries du Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne. L'approche de modélisation, utilisée à la fois pour analyser les essais et mener les études de conception et d'évaluation de sûreté, repose sur le concept de milieu poreux équivalent, jugé enveloppe en regard des objectifs recherchés.

Dans une logique de consolidation des connaissances et de quantification détaillée des marges, le travail de thèse portera sur la représentation des écoulements eau/gaz dans la zone endommagée suivant une approche « réseau de fractures discrètes » (Discrete Fracture Network). Dans un premier temps, les travaux s'appuieront sur les données expérimentales obtenues par l'Andra sur les fractures (organisation, caractéristiques d'écoulement de l'eau et du gaz, capacité d'auto-colmatage par gonflement des minéraux gonflants contenus dans les argilites) et les argilites saines (pression d'entrée de gaz, diffusion du gaz dissous...) : il s'agira notamment de bien caler la modélisation pour une comparaison pertinente entre l'approche discrète et la représentation « milieu poreux continu équivalent », en particulier vis-à-vis du réseau de fractures initial. *In fine*, sur la base des résultats obtenus, des représentations « milieu poreux continu équivalent » seront proposées comme « best estimate » pour mener des simulations du transfert à grande échelle du stockage.

9. Modélisation mécanistique du comportement différé de la zone endommagée (argilites fracturées) autour des ouvrages souterrains (projet de stockage Cigéo)

L'excavation des ouvrages souterrains dans la formation du Callovo-Oxfordien induit à leur pourtour immédiat la formation d'une zone endommagée composée de fractures plus ou moins interconnectées suivant un réseau. L'extension et la densité de ce réseau de fractures dépend de plusieurs paramètres tels que l'orientation de l'ouvrage par rapport à l'état des contraintes naturelles *in situ*, les caractéristiques mécaniques de la roche, notamment leur anisotropie, et le temps nécessaire à la mise en place d'un soutènement. Les travaux de caractérisation du comportement des ouvrages souterrains dans le Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute Marne ont montré que leur comportement différé était lié à cette zone fracturée, notamment en termes de charges mécaniques transmises au soutènement et au revêtement. Jusqu'à présent, les modèles mécaniques développés ont reposé sur le principe de milieu poreux continu équivalent et ont été jugés satisfaisants pour mener les travaux de conception et d'évaluation de sûreté.

Le travail de thèse portera sur le comportement différé de cette zone fracturée, suivant une représentation explicite du réseau de fractures. Les différents mécanismes susceptibles de contrôler ce comportement, tels que le fluage de la matrice argileuse et/ou des fractures, le gonflement au niveau des fractures et des blocs entre les fractures, les couplages hydromécaniques et le mouvement des blocs les uns par rapport aux autres, seront étudiés. En s'appuyant sur les connaissances déjà acquises, les travaux de thèse comporteront à la fois des expérimentations pertinentes en laboratoire jours et de la modélisation dédiée. On cherchera en particulier à discriminer le poids des différents mécanismes évoqués ci-dessus dans le comportement différé dans le temps. Enfin, une comparaison qualitative et/ou quantitative avec la représentation « milieu poreux continu équivalent » sera menée.

Simulation numérique

10. Modélisation des écoulements dans les réseaux karstiques (projet de stockage Cigéo)

La formation superficielle des calcaires du Barrois sur le site de Meuse/Haute-Marne 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, grés, conglomérats, alluvions, etc...).

Les études d'implantation des installations de surface et des liaisons surface-fond visent à éviter les zones karstiques, voire à les traiter si nécessaire. Pour ce faire, des modélisations hydrogéologiques ont été mises en œuvre ; jusqu'à présent et de manière conservative, ces modélisations ont été réalisées en considérant un seul milieu poreux équivalent où les écoulements sont supposés laminaires, ce qui permet ainsi l'application de la loi de Darcy.

Le travail de thèse portera sur l'amélioration des conceptualisations phénoménologique et numérique des écoulements et du transport de solutés dans l'aquifère karstique des calcaires du Barrois, suivant une modélisation explicite des écoulements turbulents/laminaires dans les conduits karstiques et des interactions hydraulique et massique avec la matrice calcaire. La robustesse d'une telle approche 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 disposant de suffisamment de données de caractérisation.

11. Développement de méthodes d'estimation d'erreur a posteriori et contrôle d'erreur pour les problèmes d'écoulement diphasique eau-gaz en milieu poreux

Les évaluations menées pour quantifier les écoulements d'eau (et de gaz) aux différentes échelles spatiales et temporelles des stockages font appel à des modèles complexes, dont la non-linéarité, la taille et les contrastes de paramètres hydro-dispersifs rendent difficiles la résolution numérique et l'évaluation de la qualité des résultats obtenus. Sur 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 de donner des réponses à ces questions 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 précision du solveur.

Le travail de thèse portera sur l'extension des formulations d'estimation a posteriori et de contrôle d'erreur, couplée à l'adaptation de maillage, à la problématique des écoulements diphasiques eau multi-composants gaz, dans le contexte des stockages de déchets radioactifs.

12. Modélisation explicite d'un réseau de fissures/fractures et de son évolution temporelle au cours du transitoire hydraulique-gaz dans des milieux à très faibles perméabilités (projet de stockage Cigéo)

L'évolution phénoménologique du stockage géologique et de la formation hôte du Callovo-Oxfordien est caractérisée par un transitoire hydraulique-gaz jusqu'au retour à un état totalement saturé et à l'équilibre hydraulique du stockage. La quantification de ce transitoire repose sur des données scientifiques acquises notamment dans le Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute Marne et par simulation numérique. Celle-ci met en jeu la représentation des différents composants du stockage et du milieu géologique, notamment la zone endommagée en champ proche des ouvrages souterrains qui se présente comme un milieu fracturé suivant un réseau plus au moins dense de fractures connectées ou non. Cette fracturation est caractérisée par une capacité d'auto-colmatage du fait de la présence de minéraux gonflant dans les argilites du Callovo-Oxfordien, d'où une diminution de la perméabilité à l'eau (alors que la pression d'entrée de gaz reste néanmoins faible). Jusqu'à présent, les simulations ont été fondées majoritairement sur le concept de milieu poreux continu équivalent, utilisé avec prudence de manière à envelopper le domaine de fonctionnement possible.

Dans une logique de consolidation des simulations déjà menées et de quantification détaillée des marges, le travail de thèse portera sur le développement d'une méthode de simulation multi-échelle permettant de simuler l'écoulement diphasique eau et gaz explicitement dans la zone endommagée, suivant un milieu argileux constitué d'un réseau de fractures/fissures plus ou moins connectées et de blocs délimités par ces fractures, avec des argilites saines (non fracturées) en conditions aux limites.

Surfaces et interfaces continentales

13. Développement de capteurs ou bio-indicateurs des changements environnementaux (projet de stockage Cigéo)

L'Andra a mis en place depuis 2009 en Meuse/Haute Marne un Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) afin de suivre l'évolution de l'environnement autour de Cigéo, avant toute construction puis durant la période séculaire d'exploitation. En amont de toute construction, l'OPE contribue à l'établissement de l'état environnemental initial dans le cadre des études d'impact, et à la définition des compensations environnementales en tant que de besoin. Lors de la construction et l'exploitation progressives de Cigéo sur une période séculaire, l'OPE doit permettre de suivre les évolutions environnementales aux différentes échelles spatiale et temporelle pertinentes, et de discriminer les différentes sources d'entropie sur l'environnement, en particulier les écosystèmes représentatifs (hêtraie, prairie, grandes cultures) et les ressources en eau. Le suivi des paramètres environnementaux repose sur un ensemble d'instrumentations dédiées aux différents compartiments environnementaux.

Dans une logique d'amélioration continue des moyens de mesure des paramètres environnementaux, le travail de thèse portera sur le développement de systèmes de mesure ou d'alerte (capteurs ou bio-indicateurs) permettant d'assurer une évaluation rapide de changements de qualité (par exemple chimique, potentiel agricole ou sylvicole, diversité biologique) des milieux, eau et sol. Les travaux pourront comprendre une phase de développement instrumental. Ils devront inclure une phase de tests et de calibration sur le site de l'OPE et/ou d'un analogue pertinent (analogues naturels, carrières, chantiers...) permettant de valider la faisabilité du déploiement des dispositifs expérimentés. Le développement d'approches pluridisciplinaires innovantes est encouragé.

14. Développement de technologies de mesure de paramètres chimiques (projet de stockage Cigéo)

Le monitoring des installations fond de cigéo sera une composante importante du développement progressif de Cigéo durant la période séculaire d'exploitation, notamment en support à la vérification d'un domaine de fonctionnement de Cigéo cohérent avec celui attendu en « après fermeture » et à la réversibilité/récupérabilité. Ce monitoring correspondra en premier lieu à un ensemble de dispositifs de mesure dimensionnés et répartis de manière adéquate (alvéoles de stockage, galeries...). Au travers des expérimentations dans le Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute Marne depuis 2002, l'Andra a déjà mis en œuvre un ensemble de dispositifs de monitoring permettant de disposer déjà de solutions opérationnelles ; à cela s'ajoutent le retour d'expériences des homologues de l'Andra dans leur propre laboratoire souterrain, mais aussi celui dans d'autres domaines (génie civil, génie minier, exploitations du sous-sol...). Néanmoins, dans une logique prospective et d'amélioration continue des moyens de mesure, l'Andra a un programme de R&D sur les capteurs, avec notamment un effort plus particulier sur les fibres optiques jusqu'à présent. Dans ce cadre général, certains paramètres mériteraient des développements de technologies en rupture :

1. *Mesure en continu du pH*

Le pH est un paramètre chimique qui caractérise un certain nombre de processus de dégradation des composants du stockage. Il existe une variété de capteurs permettant de suivre la valeur du pH au cours du temps. La plupart nécessite un étalonnage régulier, parfois avant chaque mesure, ce qui constitue une contrainte opérationnelle significative.

Le travail de thèse portera sur le développement de techniques ou de méthodes innovantes employant des électrodes dites « tout solide » qui sont (y compris l'électrode de référence) réalisées à partir de matériaux considérés comme « durables ». Une attention particulière sera donnée à la miniaturisation du capteur. Le développement d'approches pluridisciplinaires innovantes est encouragé.

2. *Développement des outils et des méthodes permettant de mesurer l'état général ou localisé d'une corrosion*

Hors les expériences en laboratoire jour à l'aide de mesure électrochimiques, le suivi des cinétiques de corrosion des aciers bas carbone en lien avec la nature de la corrosion (généralisée ou localisée) est majoritairement mené de manière intégrée, à partir notamment de témoins ou par mesure directe. La mesure en continu de la corrosion en situation de stockage est donc un développement qui permettrait son suivi plus détaillé.

Le travail de thèse portera sur le développement d'outils et de méthodes pour estimer la corrosion généralisée ou localisée par mesure directe ou indirecte du chemisage. Les techniques permettant un suivi en continu pour déterminer les vitesses de corrosion seront recherchées. Les approches de suivi indirect pourront être envisagées *via* la mesure de paramètres physico-chimiques et électrochimiques ou le développement de capteurs témoins. Les approches directes (ondes...) seront possibles mais devront prendre en compte les contraintes imposées sur les liaisons du chemisage (constitué de tronçons successifs), réalisées à ce jour par emboîtement simple (liaisons en cours de conception). Le développement d'approches pluridisciplinaires innovantes est encouragé.

15. Caractérisation in situ par des méthodes géophysiques de la zone endommagée autour des ouvrages souterrains (projet de stockage Cigéo)

Développée avec une grande maîtrise depuis 2002 dans le Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute Marne, la caractérisation explicite de la zone endommagée (organisation, densité de fractures et extension du réseau de fracture depuis la paroi) est actuellement réalisée par des levés géologiques des fronts et en forages depuis la paroi. Cette méthodologie pourra être reprise dans Cigéo. L'existence de méthode « automatique », en particulier depuis la paroi des ouvrages au cours de leur exploitation depuis la construction jusqu'à la fermeture, constituerait un progrès important.

Le travail de thèse portera sur le développement d'une méthode géophysique innovante pour caractériser la zone endommagée (organisation et extension du réseau de fractures) aux échelles pertinentes et en regard des dimensions des fractures (ouverture millimétriques à infra-millimétrique des fractures, extension pluri-métrique de la zone endommagée ...), de manière non intrusive depuis la paroi des ouvrages. Des mesures indirectes (par exemple par des méthodes acoustiques, résistives ou RMN) pourraient être associées. La faisabilité et les limites de mise en œuvre devront être précisées.

Sciences Humaines et Sociales

16. L'administration de la preuve technoscientifique

Les temporalités impliquées dans la gestion des déchets radioactifs, et plus particulièrement en ce qui concerne la modélisation-simulation numérique en vue de la démonstration de sûreté du stockage géologique, sont uniques en comparaison avec d'autres domaines industriels. Elles posent notamment la question de la crédibilité des travaux scientifiques et techniques à cet égard pour les non spécialistes. Cette question se pose typiquement aussi, de façon générale, dans les technosciences, les sciences pour la réglementation et les grands projets d'infrastructures et de recherche, lorsque le recours à l'expérience est difficile. Dans ces situations, le traitement des incertitudes propres à l'expérimentation numérique renvoie normalement à d'autres formes d'expérimentation et de modélisation analogiques, à l'ingénierie et à la scénarisation.

Le travail de thèse portera sur les régimes de justification et de décision caractéristiques dans ces domaines et l'administration collective de la preuve.

17. Gouvernance des « mégaprojets » et temporalités extrêmes (projet de stockage Cigéo)

Les enjeux associés au projet de stockage géologique Cigéo, notamment du fait de la réversibilité inscrite dans la loi française de juillet 2016, font de ce projet scientifique et industriel un « mégaprojet » à caractère exceptionnel.

Le travail de thèse est portera sur les spécificités de Cigéo du point de vue décisionnel, faisant appel notamment à des approches socio-économiques et juridiques comparatives dans une perspective large, au-delà du cadre national-local. On s'intéressera ainsi, par exemple, au rôle de l'évaluation « en continu » en tant qu'instrument de gouvernance et d'apprentissage collectif ou à la manière de déterminer les responsabilités et les obligations sur le long terme.

Knowledge management

18. Ingénierie des connaissances et transmission du savoir

Des projets tels que ceux qui visent à définir, construire, exploiter puis surveiller des stockages de déchets s'étalent sur des durées telles, qu'ils nécessitent la transmission intergénérationnelle du savoir. Cette gestion des connaissances a pour enjeu la transmission du savoir dans le temps et sa capitalisation pour mieux en assurer l'information et la distribution. Elle doit aussi, grâce à la mise en place de méthodes et d'outils, permettre de prendre les meilleures décisions, en particulier lorsqu'elles sont complexes et qu'elles mobilisent de nombreux savoirs, et favoriser l'émergence de l'innovation.

Depuis plusieurs années déjà, l'Andra a mis en place des outils performants de gestion des données, essentiellement scientifiques, et de gestion documentaire. Ces moyens se focalisent toutefois sur les connaissances explicites mais n'abordent que très peu ce qui est lié au savoir tacite, c'est-à-dire le savoir-faire, le savoir-être, l'expérience et les compétences spécifiques, beaucoup plus complexes à codifier puis à externaliser sous forme de savoir explicite.

Ce travail de thèse, centré sur la capitalisation et le partage des connaissances, portera ainsi sur l'étude des moyens et outils à mettre en œuvre pour formaliser efficacement le savoir tacite des

collaborateurs, que ce soit par exemple via la mise en place de réseaux de partage de l'information et du retour d'expérience ou la valorisation informatique de ressources documentaires. Il se fondera notamment sur un état des lieux des pratiques engagées dans de nombreux organismes sur ces aspects, et du retour d'expérience déjà acquis. Une analyse spécifique du fonctionnement actuel de l'Andra et des axes de progrès sera réalisée.