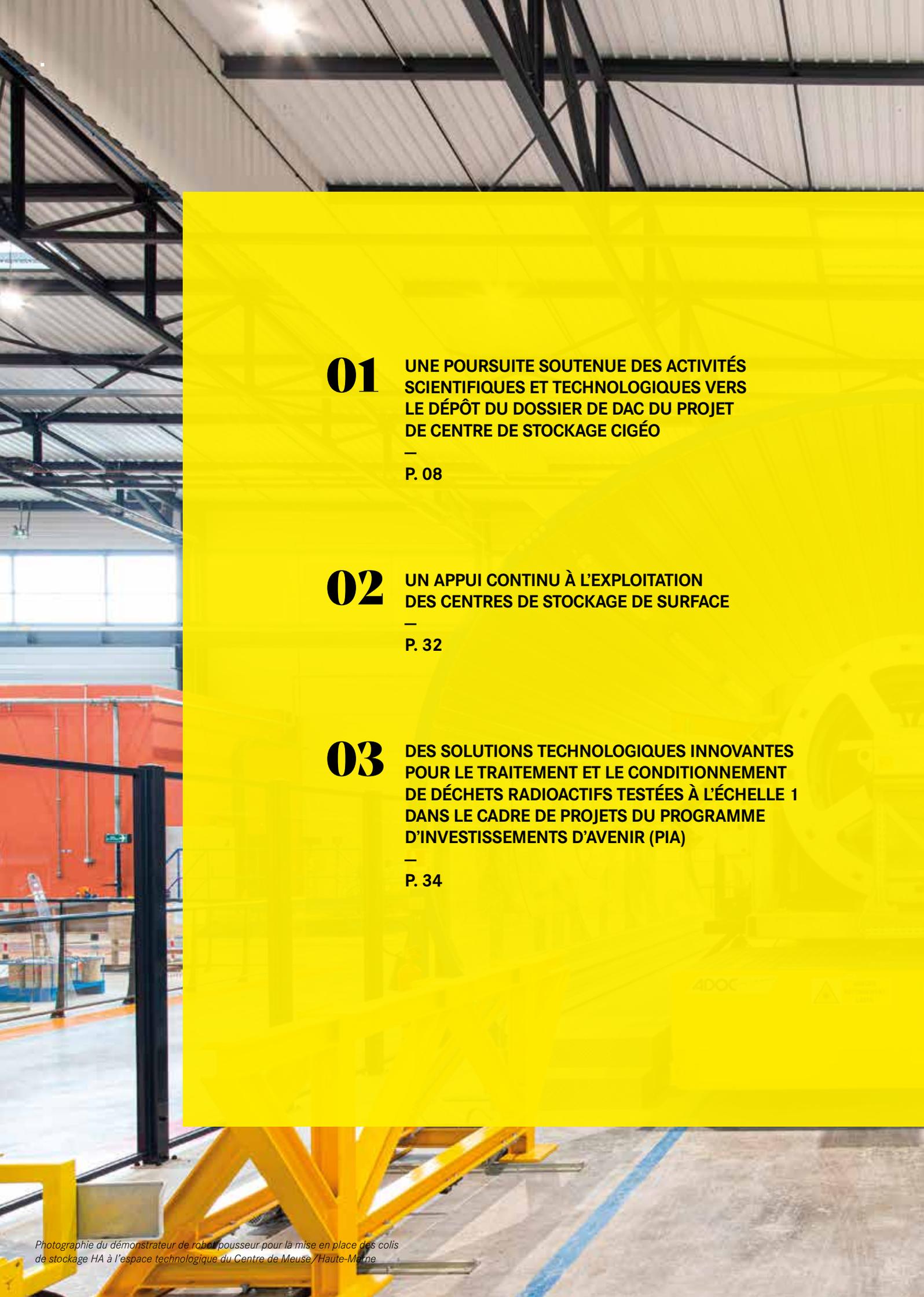


**RAPPORT
D'ACTIVITÉS**

Scientifiques et techniques

2020





01 UNE POURSUITE SOUTENUE DES ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES VERS LE DÉPÔT DU DOSSIER DE DAC DU PROJET DE CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO

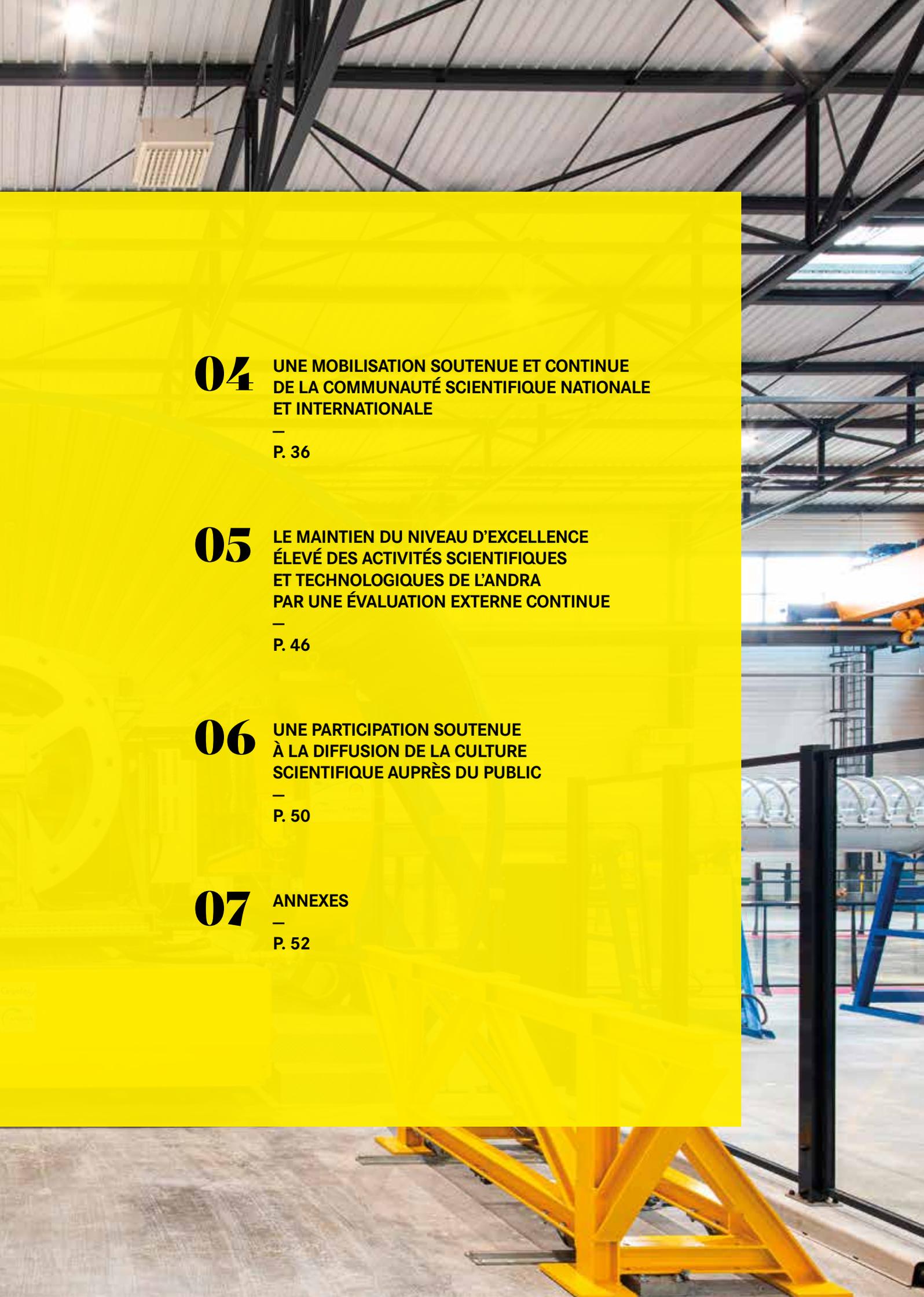
—
P. 08

02 UN APPUI CONTINU À L'EXPLOITATION DES CENTRES DE STOCKAGE DE SURFACE

—
P. 32

03 DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES INNOVANTES POUR LE TRAITEMENT ET LE CONDITIONNEMENT DE DÉCHETS RADIOACTIFS TESTÉES À L'ÉCHELLE 1 DANS LE CADRE DE PROJETS DU PROGRAMME D'INVESTISSEMENTS D'AVENIR (PIA)

—
P. 34



04 UNE MOBILISATION SOUTENUE ET CONTINUE
DE LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE NATIONALE
ET INTERNATIONALE

—
P. 36

05 LE MAINTIEN DU NIVEAU D'EXCELLENCE
ÉLEVÉ DES ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES
ET TECHNOLOGIQUES DE L'ANDRA
PAR UNE ÉVALUATION EXTERNE CONTINUE

—
P. 46

06 UNE PARTICIPATION SOUTENUE
À LA DIFFUSION DE LA CULTURE
SCIENTIFIQUE AUPRÈS DU PUBLIC

—
P. 50

07 ANNEXES

—
P. 52





Édito

Pierre-Marie Abadie
Directeur général de l'Andra



***Malgré le contexte sanitaire,
les équipes de l'Andra
et de ses partenaires
ont su s'adapter
et rester mobilisées***



L'année 2020 sera à jamais marquée par la crise subite de la Covid-19 et le confinement du début d'année, auquel notre pays comme beaucoup d'autres a dû faire face. Dans ce contexte difficile et inédit, les équipes de l'Andra, et parmi elles les scientifiques et les ingénieurs de la recherche et développement scientifique et technologique, ont su s'adapter et maintenir au mieux un niveau d'activités permettant à l'Agence de remplir sa mission d'intérêt général de gestion des déchets radioactifs. Elles n'auraient pas pu le faire sans, en parallèle, le même effort et la même volonté de nos partenaires et sous-traitants de la recherche et développement. Malgré les conditions imposées par la pandémie (fermetures temporaires des organismes de recherche et du Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute Marne, reports des manifestations scientifiques et technologiques, travail à distance, etc.), tous ont su rester mobilisés et solidaires pour faire front et atteindre les objectifs fixés. Le dépôt à mi-année 2020 du dossier de demande de Déclaration d'utilité publique (DUP) du projet de centre de stockage Cigéo en est une illustration concrète. Le rapport d'activités scientifiques et technologiques 2020 en est une autre, attestant d'avancées scientifiques et technologiques significatives réalisées grâce à l'engagement des personnels de l'Andra et de l'ensemble de ses partenaires académiques et industriels, à qui j'adresse tous mes remerciements.

Je vous souhaite une excellente lecture du rapport 2020 des activités scientifiques et technologiques de l'Andra et je vous invite, en tant que de besoin, à prendre contact avec nos équipes pour toutes informations complémentaires ou questions.



Les temps forts de 2020

Photographie de la célébration des 20 ans du Laboratoire souterrain.

Janvier

Lancement du partenariat de recherche tripartite CEA/EDF R&D/Andra

Février

Installation du banc d'essai du funiculaire de descenderie du projet Cigéo à Froncles

Chantier 4 au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne : début du creusement de la galerie de grand diamètre représentative d'un alvéole de stockage de déchets MA-VL

Mars-Mai

Interruption d'une partie des activités scientifiques et techniques pendant le confinement (fermeture des installations dont le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, annulation de campagnes d'échantillonnage, etc.)

Juin

Mise en chauffe d'un démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, représentatif du concept porté au dossier de Demande d'autorisation de création



Août

Atteinte des 2 000 m de galeries creusées au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

Dépôt du dossier de demande de Déclaration d'utilité publique du projet Cigéo

Septembre

20 ans du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

Lancement de la deuxième phase de creusement pour la galerie constituant l'une des branches du carrefour en X

Octobre

Atteinte du kilomètre de démonstrateurs d'alvéoles de stockage de déchets HA au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

Creusement d'un deuxième démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA, représentatif du concept porté au dossier de Demande d'autorisation de création

Novembre

Mise en service d'un bâtiment à la station atmosphérique de l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) à Houdelaincourt, un nouvel environnement performant pour les dispositifs de mesure

01

Une poursuite soutenue des activités scientifiques et technologiques vers le dépôt du dossier de DAC du projet de centre de stockage Cigéo



Photographie d'un relevé topographique dans une galerie du Laboratoire souterrain

La capitalisation des connaissances scientifiques et technologiques acquises depuis 30 ans par l'Andra et ses partenaires de recherche s'est poursuivie en 2020 à travers la formalisation d'un socle de connaissances qui sera porté au dossier de Demande d'autorisation de création (DAC) du centre de stockage Cigéo. Néanmoins, les activités scientifiques et technologiques ont d'ores et déjà engagé une évolution pour répondre aux grands enjeux opérationnels qui suivront le dépôt du dossier de DAC. Il s'agit plus particulièrement de préparer la phase industrielle pilote, qui serait lancée si un avis favorable est donné suite à l'instruction du dossier de DAC, mais aussi les progrès et optimisations de demain en soutien au développement progressif du projet de centre de stockage Cigéo.

Parmi ces travaux figurent notamment les démonstrateurs technologiques et les expérimentations scientifiques du chantier 4 au Laboratoire souterrain de Meuse/ Haute-Marne pour l'installation fond du projet de centre de stockage Cigéo et le lancement d'un programme de caractérisation et de modélisation détaillées de la formation des Calcaires du Barrois, en réponse à la fois aux besoins des futures études d'impact et de conception, et aux besoins de suivi de la réalisation et l'exploitation des installations de surface du projet de centre de stockage Cigéo en zone Descenderie.

L'approche du jalon du dossier de DAC et la préparation de la phase industrielle pilote expliquent la très large part des activités scientifiques et techniques de l'Andra dédiées en 2020 au projet de centre de stockage Cigéo.

Dans ce cadre général, mi-2020, l'Andra a franchi une étape importante de ce projet avec le dépôt d'une demande de Déclaration d'utilité publique (DUP) préalable à celui du dossier de DAC. L'étude d'impact afférente s'est notamment appuyée sur l'exploitation et l'analyse des données scientifiques (géologiques, hydrogéologiques, environnementales, etc.) acquises depuis plus de 20 ans par l'Andra sur le territoire de Meuse/Haute-Marne.

LA MISE EN PLACE D'UNE ORGANISATION ADAPTÉE AU LABORATOIRE SOUTERRAIN DU CENTRE DE MEUSE/HAUTE-MARNE POUR POURSUIVRE LE CHANTIER 4 MALGRÉ LA CRISE SANITAIRE

La période de confinement due à l'épidémie de la Covid-19 a imposé la fermeture du Laboratoire souterrain du 16 mars 2020 jusqu'au 18 mai 2020. Tous les travaux ont été arrêtés et les différents chantiers, ainsi que les expérimentations scientifiques et les démonstrateurs technologiques, ont été sécurisés. Pour la plupart des expérimentations, les outils de gestion et de suivi à distance ont néanmoins permis de vérifier quotidiennement l'acquisition des données et l'absence d'anomalies/défaillances des systèmes expérimentaux.

La mise en place d'une organisation adaptée au respect des gestes barrières a permis de reprendre l'ensemble des activités scientifiques et technologiques dès mai 2020, et notamment le chantier 4, dont les démonstrateurs à l'échelle 1 viendront consolider les connaissances scientifiques et techniques déjà acquises et permettront, au-delà de la démonstration de faisabilité, d'apporter les éléments nécessaires à la préparation de la phase industrielle pilote. Ce sont ainsi plus de 75 m de galeries qui ont été creusées entre autres dans le cadre de la réalisation d'un prototype de galerie de grand diamètre représentatif d'un alvéole de déchets MA-VL (essai OMA, de 10 m de diamètre final sur 80 m de long), de la préparation d'un essai de remblaiement de galerie (cf. image

page 11) et de la préparation de l'instrumentation et la réalisation du premier carrefour à quatre branches qui sera finalisé courant 2021 (cf. image ci-dessous). En complément de ces activités de creusement, 141 forages scientifiques ont été réalisés pour l'observation, les suivis géologiques, le prélèvement d'échantillons ou la mise en place de sondes et de capteurs.



Creusement du carrefour à quatre branches au Laboratoire souterrain

TÉMOIGNAGES
ÉMILIA HURET
&
OLIVIER
ALAVOINE



De nombreuses **expérimentations scientifiques** se sont poursuivies comme :

- l'expérimentation TSF (Transmission sans fil) qui a permis de tester de nouveaux transmetteurs sans fil capables de communiquer avec différents types de capteurs à travers la roche sur une distance de 20 mètres ;
- l'expérimentation CRQ (Comportement thermo-hydro-mécanique représentatif du Callovo-Oxfordien autour d'un quartier HA) dont l'objectif est de reproduire à l'échelle pluri-métrique, dans le Callovo-Oxfordien, un chemin de contrainte effective, de pression interstitielle et de température similaire à celui que l'on observerait autour des quartiers HA de Cigéo. Cette expérimentation s'inscrit dans la justification du dimensionnement thermique des quartiers HA retenu dans le dossier de Demande d'autorisation de création de Cigéo ;
- la mise en place de l'expérimentation RTG (*Radio-isotopic thermal generator* [Générateur autonome isotopique]) à l'espace technologique avec un prototype de générateur thermoélectrique à radio-isotope développé dans le cadre du programme d'investissements d'avenir « Nucléaire de Demain ». Ce générateur a pour but *in fine* de produire une petite quantité d'électricité à partir d'une source de chaleur (à terme l'élément radioactif américium, simulé à ce stade).

Concernant les **essais technologiques**, trois nouveaux démonstrateurs d'alvéoles de stockage de déchets HA ont été réalisés en 2020. Deux démonstrateurs de 20 mètres de longueur ont été réalisés dans le cadre de l'expérimentation HAE (Alvéole HA et Échanges gazeux) pour quantifier finement les échanges de gaz entre l'alvéole, la galerie et la roche puis tester un dispositif destiné à limiter les échanges de gaz. Le troisième démonstrateur AHA1607, de 80 m de longueur, a pour objectif de vérifier la faisabilité technique de pose d'un système de contrôle de gestion de l'atmosphère de l'alvéole et de poursuivre les travaux d'instrumentation non intrusive de l'alvéole à l'extrados

du chemisage. Par ailleurs, un nouvel essai de chauffe a été lancé sur le démonstrateur d'alvéole ALC1605, pour une durée minimale de cinq ans, afin de représenter l'effet thermique que produiront les colis de déchets HA, obtenir des mesures supplémentaires sur le comportement global du Callovo-Oxfordien sous sollicitation thermique et évaluer plus précisément l'influence de la présence du matériau de remplissage entre la roche et l'extrados du chemisage sur le chargement mécanique transmis à ce dernier. Ce démonstrateur contribuera également à évaluer, en conditions de température, la faisabilité d'une instrumentation non intrusive envisagée pour la surveillance de Cigéo en extrados du chemisage.

Enfin, malgré la crise de la Covid-19, le Laboratoire souterrain de l'Andra en Meuse/Haute-Marne a fêté ses **20 ans** en 2020 (cf. image ci-dessous). Depuis 2000, plus de 80 expérimentations scientifiques et essais technologiques se sont déployés progressivement sur un large spectre de domaines scientifiques et technologiques (géosciences, sciences des matériaux, travaux souterrains,



Les 20 ans du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne en 2020 : photographie de la fresque réalisée à cette occasion sur le front de la section supérieure de la galerie expérimentale GRD6 en cours de creusement pour la réalisation du démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets MA-VL (OMA)



ÉMILIA HURET

Cheffe de centre, Centre de Meuse/Haute-Marne, Direction industrielle et Grand Est

2020 est une date anniversaire particulière pour le Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne. Face à la crise sanitaire, l'année 2020 a démontré la force du travail collectif de l'Andra et la capacité de l'ensemble des équipes scientifiques et opérationnelles de l'Agence, ainsi que des partenaires et prestataires scientifiques, à faire preuve d'adaptabilité et à rester mobilisés pour reprendre les activités et atteindre les objectifs fixés en support au futur dossier de DAC du projet de centre de stockage Cigéo.

L'année 2020, ce sont 2 000 mètres de galeries déjà creusées dans lesquelles, depuis 20 ans, plus de 80 expérimentations scientifiques et essais technologiques sont menés et instrumentés pour nourrir les travaux de conception,

d'optimisation et d'évaluation de sûreté du projet de centre de stockage Cigéo. Cette année 2020 a marqué la poursuite d'un chantier de creusement, le chantier 4, initié en 2019. Il préfigure la réalisation d'un important programme de démonstrateurs technologiques, au plus près de la réalité de l'installation souterraine du projet de centre de stockage Cigéo, comme le début de la construction du démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets MA-VL proche de l'échelle 1, la préparation de futurs essais scientifiques et technologiques relatifs aux ouvrages de fermeture (remblais et scellements) et la réalisation de nouveaux démonstrateurs d'alvéoles de stockage de déchets HA représentatifs du concept retenu pour le quartier pilote HA, prévu dans le cadre de la phase industrielle pilote.



Photographie du bétonnage du front définitif de la galerie GET2 (croix de Saint-André), creusée en préparation des essais de remblaiement de galerie du chantier 4

monitoring, etc.). Leurs résultats ont nourri les différents dossiers du projet de centre de stockage Cigéo au fur et à mesure de son développement. Le chantier de creusement en cours et le programme scientifique et technologique associé, qui permettent de répondre à la plupart des demandes et engagements pris par l'Andra suite à l'instruction du dossier d'options de sûreté de 2015, viennent consolider le socle de connaissances pour le dossier de DAC du projet de centre de stockage Cigéo et préparer la réalisation de la phase industrielle pilote.

LE CHANTIER 4 : UN NOUVEAU CHANTIER MAJEUR AU LABORATOIRE SOUTERRAIN DE MEUSE/Haute-MARNE À DOMINANTE TECHNOLOGIQUE

Les nouvelles galeries du chantier 4 en cours de creusement en 2020 s'accompagneront de nouvelles expérimentations scientifiques et technologiques. Elles visent à acquérir des données complémentaires à celles déjà obtenues dans le but d'optimiser les méthodes de construction et de consolider la démonstration de la robustesse des dimensionnements des ouvrages souterrains de Cigéo :

- **la réalisation de la galerie GRD6 (expérimentation OMA), orientée suivant la contrainte horizontale majeure *in situ* avec un diamètre d'environ 9,6 m sur une longueur de 80 m.** Représentative d'un alvéole de stockage de déchets MA-VL, cette expérimentation permettra de montrer plus encore la faisabilité technologique du creusement d'un alvéole (avec les moyens techniques disponibles au laboratoire), de la mise en place d'un revêtement avec des éléments compressibles par les méthodes traditionnelles et d'un génie civil interne tel que prévu pour Cigéo. Les données acquises sur le comportement hydromécanique à court terme et long terme du Callovo-Oxfordien en champ proche et du soutènement/revêtement en béton permettront de disposer de données supplémentaires confirmant l'absence d'effet d'échelle entre les ouvrages de 5 m et de 10 m de diamètre, ainsi que la bonne maîtrise du comportement hydromécanique de la roche endommagée autour des ouvrages souterrains à l'origine des efforts mécaniques sur leurs soutènements/revêtements ;



OLIVIER ALAVOINE

Responsable des essais technologiques,
Direction de l'Ingénierie

En 2020, le travail d'amélioration continue des techniques de construction et de monitoring des alvéoles de stockage de déchets HA s'est poursuivi. La mise en œuvre de tubulures en extrados du chemisage pour le contrôle si besoin de l'atmosphère interne d'un démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA et la réalisation de deux autres démonstrateurs pour de futurs essais autour des échanges gazeux entre un alvéole et sa galerie constituent des avancées notables.

Il en est de même pour la réalisation d'un alvéole prototype de stockage de déchets MA-VL, l'essai OMA, qui apportera des éléments de réponse aux engagements de l'Andra auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire concernant la démonstration de la faisabilité technologique de réalisation de galeries de grande taille représentatives des futures alvéoles de stockage de déchets MA-VL et de la mise en place d'un dispositif de monitoring associé.

Les activités des années à venir seront intenses et contribueront à alimenter en données technologiques et scientifiques le développement du projet de centre de stockage Cigéo, en particulier en support à l'instruction du futur dossier de Demande d'autorisation de création, le dossier de DAC dans notre expression Andra.

- **l'intensification de l'instrumentation des carrefours pour améliorer la compréhension du comportement hydromécanique des intersections de galeries.**

Dans tous les ouvrages souterrains, la conception et le dimensionnement des intersections de galeries est un enjeu d'optimisation du fait de leur géométrie complexe et de la concentration locale de contraintes. Acquérir de nouvelles données plus exhaustives (déformation, fracturation induite, etc.) pour différentes géométries de carrefour (en T ou en X) permettra d'accroître la maîtrise du comportement hydromécanique à court et long terme des carrefours afin d'alimenter les travaux d'optimisation ;

- **la dépose de revêtements en voussoirs**, soit pour la réalisation de scellements (dépose totale d'anneaux de voussoirs), soit pour la réalisation d'intersections (dépose partielle d'anneaux consécutifs).

Cette expérimentation présente des enjeux de sécurité de réalisation et d'accroissement de la maîtrise du comportement hydromécanique local de la roche (analyse de l'extension potentielle de la zone fracturée initialement induite par le creusement, reports de charge dans les structures béton adjacentes aux zones de dépose).

L'autre objectif du chantier 4 est la mise en place de démonstrateurs de scellement avec des remblais à base d'argilites excavées, des noyaux en argile gonflante et des massifs d'appuis en béton. Plusieurs essais seront réalisés dans des galeries de 6 m de diamètre environ pour étudier différentes solutions techniques. Des systèmes d'hydratation artificielle seront mis en place pour pouvoir *in fine* évaluer la performance hydraulique et hydromécanique de tels ouvrages. Ces essais de démonstration de scellement feront l'objet de suivis sur plus d'une décennie.

LE MILIEU GÉOLOGIQUE

L'HYDROGÉOLOGIE DE LA FORMATION SUPERFICIELLE DES CALCAIRES DU BARROIS OÙ SERONT IMPLANTÉES LES INSTALLATIONS DE SURFACE

La mise en place d'un programme de caractérisation et de modélisation adapté au caractère épi-karstique des Calcaires du Barrois

Les installations de surface du centre de stockage Cigéo seront construites sur la formation géologique affleurante (c'est-à-dire superficielle) des Calcaires du Barrois. Pour répondre à la fois à des enjeux forts de protection de l'environnement et de construction des futures installations de surface du centre de stockage Cigéo, l'Andra et ses partenaires scientifiques, notamment le BRGM, mettent en œuvre un programme scientifique de caractérisation et de modélisation détaillées du fonctionnement hydrogéologique des Calcaires du Barrois. Complémentaire aux travaux déjà menés en support au dossier de demande de DUP en 2020, ce programme vise à une représentation détaillée de l'aquifère des Calcaires du Barrois, en lien avec les dispositifs de surveillance de l'environnement. Il se décline donc à la fois en caractérisations géologiques, hydrologiques, hydrogéologiques ainsi qu'en travaux de développement et de mise en œuvre de modèles hydrogéologiques numériques, de complexités

variables. Les résultats alimenteront les différentes études d'impact qui se succéderont après celle de la DUP.

Un objectif scientifique majeur est de rendre en compte de manière fine des spécificités de l'aquifère, à savoir sa structure faite de couches plus ou moins perméables et la présence, au droit et en aval des futures installations de surface du projet Cigéo en zone Descenderie, de phénomènes de karstification, en s'appuyant sur des méthodes et outils adaptés et éprouvés scientifiquement. La méthode Karsys (cf. image ci-dessous), spécialement développée pour ce type de milieux par l'ISSKA (Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie) et mise en œuvre par le BRGM, permettra d'intégrer l'ensemble des données géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques pour définir un modèle conceptuel 3D du fonctionnement hydrogéologique, qui constitue la base des nouveaux développements des simulations numériques.

Ainsi, l'ensemble des données collectées depuis de nombreuses années à partir des forages et du réseau de piézomètres et dispositifs installés sur les cours d'eau sera complété par l'installation de nouvelles stations de mesures de débit sur les cours d'eau et de nouveaux piézomètres qui permettront, à terme, de « caler » les modèles numériques à différentes échelles autour des installations de surface et pourront s'intégrer dans le réseau de surveillance de l'environnement.

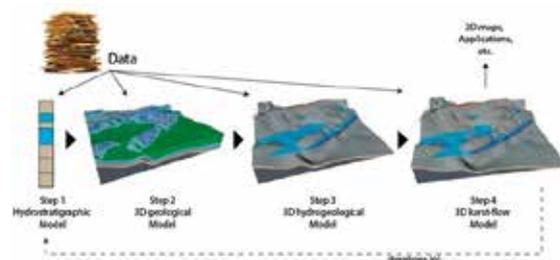


Illustration des différentes étapes de la méthodologie Karsys (Jeannin et al., 2013, Malard et al., 2014)

TÉMOIGNAGE
SYLVAIN
GIGLEUX



SYLVAIN GIGLEUX

Ingénieur hydrogéologue, Service Transferts, Direction de la Recherche et Développement

L'Andra a déjà acquis depuis plus de 20 ans de nombreuses données et connaissances sur le milieu géologique et hydrogéologique des Calcaires du Barrois dans le secteur du Laboratoire souterrain et des futures installations de surface du centre de stockage Cigéo.

Pour pouvoir échanger avec nos différents partenaires (BRGM, Centre hydrogéologique de Neufchâtel, universités de Franche-Comté, d'Avignon et de Lorraine, etc.) dans le but de construire un programme de caractérisation et de modélisation plus précises des Calcaires du Barrois, il était essentiel que chacun des acteurs impliqués puisse disposer d'un niveau de connaissance équivalent concernant le projet de centre de stockage Cigéo, l'historique des travaux de caractérisation, la compréhension du fonctionnement

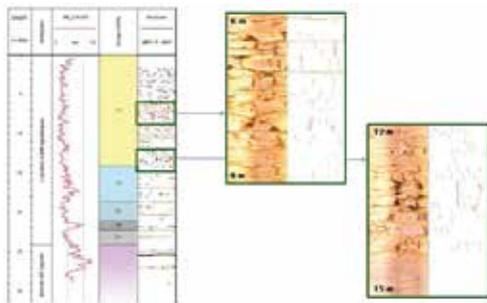
de l'hydro-système des Calcaires du Barrois et les travaux de modélisation numériques déjà réalisés. Dans le cadre du programme dit des Calcaires du Barrois, nous avons organisé avec mes collègues de l'Andra géologues, modélisateurs et ingénieurs en charge du pilotage technique du projet de centre de stockage Cigéo, des réunions d'échanges pluridisciplinaires avec nos partenaires scientifiques. Leur regard extérieur nous a permis d'approfondir notre compréhension du fonctionnement global de cet aquifère et de cibler nos besoins de développement et de mise en œuvre d'outils et de méthodes adaptés aux formations calcaires de surface, prenant en compte spécifiquement les phénomènes d'infiltration en zone insaturée, les connexions entre nappes souterraines et cours d'eau et la dynamique rapide d'écoulement dans les structures karstiques.

Une caractérisation 3D de la répartition et de l'extension de la fracturation des Calcaires du Barrois

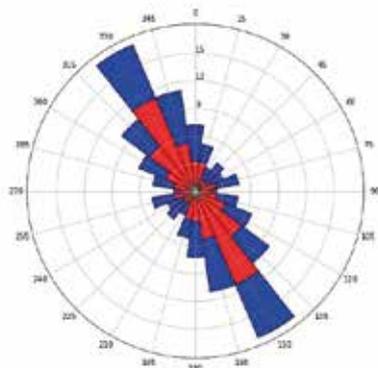
La majeure partie des écoulements dans cette formation, caractérisée par une faible porosité et une faible perméabilité matricielle, se fait *via* un réseau de fractures et de structures karstiques associées. La caractérisation de cet ensemble en 3D est importante pour représenter de manière précise la variabilité spatiale des propriétés hydrogéologiques nécessaires à l'élaboration du modèle hydrogéologique.

La caractérisation d'un réseau de fractures nécessite d'acquérir les propriétés des fractures individuelles telles que leurs dimensions (hauteur et longueur), leur orientation, leur pendage et leur ouverture et d'établir leurs relations hiérarchiques (relations d'intersection, chronologie relative, etc.). Pour réunir l'ensemble de ces informations en quantités suffisantes, plusieurs méthodes et objets d'observation sont combinés : affleurements, carottes, diagraphies (essentiellement imageries de paroi), profils géophysiques et télédétection.

L'imagerie optique acquise dans 34 forages a permis d'obtenir une reproduction déroulée et orientée de la paroi des forages en couleurs naturelles. L'analyse d'image a, elle, permis de donner les caractéristiques de la fracturation et de l'altération depuis la surface ainsi que leur intensité, et leur orientation dans certains cas. La description de la fracturation de carotte a complété l'analyse d'image.



Exemple d'imagerie de paroi et de pointé associé à un forage réalisé dans la formation des Calcaires du Barrois dans la future zone Descenderie du projet de centre de stockage Cigéo



Orientation des fractures pointées sur l'imagerie des parois des forages réalisés dans les Calcaires du Barrois dans la future zone Descenderie du projet de centre de stockage Cigéo (en rouge = structures ouvertes)

L'ensemble des données disponibles sur l'emprise de la zone Descenderie montre que l'épaisseur de la zone (ou intervalle) fracturée varie de 5 à 24 m et que l'extension verticale de la fracturation semble être en partie contrôlée par les intercalations marneuses les plus épaisses avec l'arrêt ou la diminution nette de la densité de fracturation sur ou dans ces niveaux. La circulation d'eau météorique depuis la surface, entraînant la dissolution des calcaires, affecte principalement les diaclases créées lors des épisodes tectoniques antérieurs, ce phénomène étant renforcé par la succession des phases de gel-dégel sur les derniers cycles glaciaires/interglaciaires, et ce d'autant plus avec la proximité de la surface. La synthèse des orientations des structures pointées sur l'imagerie de paroi fait ressortir une direction privilégiée N150°E. Cette méthode, couplée aux observations de terrain et de télédétection, permet ainsi de disposer d'un bon modèle de répartition et d'extension de la fracturation, donnée d'entrée pour la modélisation des écoulements superficiels dans ce milieu karstique diffus que sont les Calcaires du Barrois.

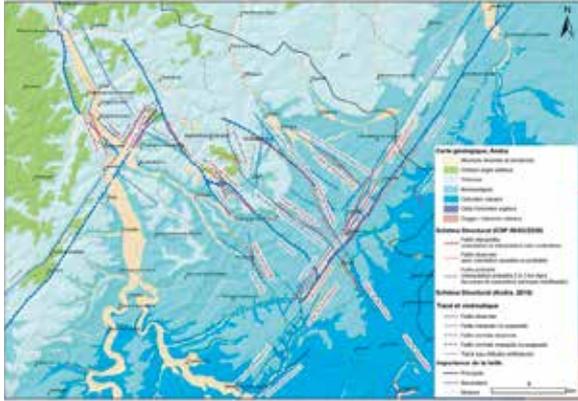
L'ACTUALISATION DU SCHÉMA STRUCTURAL RÉGIONAL DE LA ZONE D'IMPLANTATION DU PROJET DE CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO EN SUPPORT À L'ÉVALUATION DE L'ALÉA SISMIQUE POUR LE DOSSIER DE DAC

Dans le cadre de la mise à jour des évaluations de l'aléa sismique pour le dimensionnement des installations du centre de stockage Cigéo, le schéma structural régional, et plus particulièrement la zone dite de « fracturation diffuse » (située entre les fossés de Joinville à l'ONO et de Gondrecourt-le-Château à l'ESE), a été actualisé en collaboration avec CDPC Consulting, sur la base des progrès réalisés dans le domaine du traitement sismique.

Réalisés sur l'ensemble des études menées depuis plus de 20 ans (terrain, acquisition et retraitement sismique, etc.), les retraitements effectués ont permis de mieux harmoniser les acquisitions des campagnes sismiques antérieures, d'accroître la cohérence entre les horizons et les intersections de profils, de mieux identifier les fausses structures par corrections statiques et éliminer les artefacts sismiques mimant des déformations, et enfin d'améliorer la définition des failles en appliquant une migration en temps avant sommation. Une interprétation de l'ensemble des profils retraités par une classification et une hiérarchisation des failles observées dans la couverture sédimentaire (tracé sûr, certain, probable et possible) a permis d'acquérir le schéma structural final pour chaque niveau géologique repère, intégrant l'ensemble des données géologiques.

Les apports de cette actualisation sont nombreux et consolident la compréhension structurale et tectonique déjà établie de la zone d'implantation du projet de centre de stockage Cigéo, tout en la simplifiant (cf. image page suivante). L'étude structurale des unités se développant entre la base du Trias et le toit du Jurassique fournit une cartographie mise à jour du réseau de failles, où celles de direction N155°E contrôlent la bordure du bassin Paléozoïque. Elle précise par ailleurs les modalités de la mise en place de ces déformations

en apportant un éclairage original pour la compréhension de l'histoire et l'importance de l'héritage structural hercynien dans les déformations pyrénéennes voire alpines, à l'origine de la mise en place de structures en fleur jamais observées et décrites auparavant (cf. image ci-dessous).



Comparaison du schéma structural actualisé en 2020 avec celui de 2008 (en bleu)

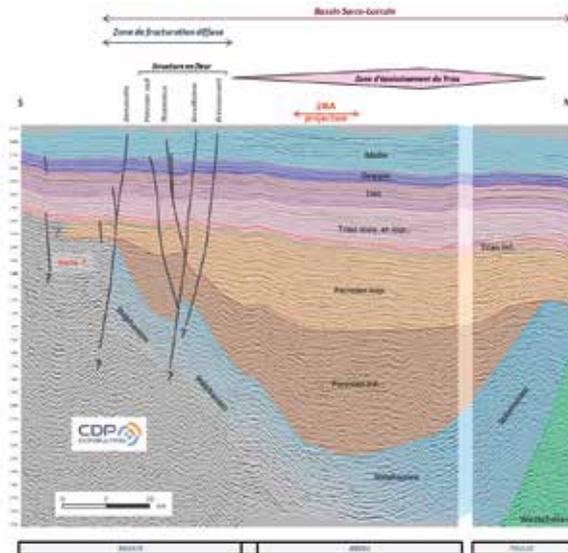


Schéma de la ligne régionale NS (en temps double) recoupant le bassin sarro-lorrain (ici la prolongation du synclinal de Sarreguemines), composée de plusieurs profils sismiques (88GAY4, 88BIE2, 88BIE3 et TOUL10), montrant la relation entre la zone de fracturation diffuse située plus au sud de la zone d'implantation de l'installation souterraine du projet de centre de stockage Cigéo et la terminaison méridionale du bassin sarro-lorrain

LA MODÉLISATION DE L'AUTO-COLMATAGE DES ARGILITES DU CALLOVO-OXFORDIEN MÉCANIQUEMENT ENDOMMAGÉES AU POURTOUR DES OUVRAGES SOUTERRAINS

Les études expérimentales réalisées tant sur échantillons qu'*in situ* dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne ont toutes montré la capacité d'auto-colmatage des argilites du Callovo-Oxfordien endommagées mécaniquement (fracturation et/ou microfissuration diffuse). Ainsi, l'hydratation d'une zone initialement fracturée conduit à la fermeture des fractures et corrélativement

à une cicatrisation hydraulique de la zone, à savoir une diminution de plusieurs ordres de grandeurs de la perméabilité à l'eau jusqu'à une valeur très proche de celle des argilites non endommagées. Ces phénomènes sont liés à la présence de minéraux argileux gonflants, les smectites, dans les argilites.

Dans le cadre d'une collaboration entre l'Andra et l'université de Pau et des Pays de l'Adour, un premier modèle constitutif de description de l'auto-colmatage d'argilites fracturées a été développé. Il combine un modèle élastoplastique endommageable et une déformation additionnelle de gonflement/retrait en fonction du degré de saturation en eau. La dépendance de paramètres à la teneur en eau (module de Young, résistances en compression et en traction et énergie de fracturation) est incorporée dans le modèle ainsi que la prise en compte des effets d'hystérésis suivant que l'on se trouve sur un chemin d'imbibition ou de séchage. La fracturation (ouverture/fermeture, mais aussi propagation) est estimée par la régularisation de l'énergie de rupture à partir de la variable d'endommagement.

Le modèle reproduit correctement le gonflement sous hydratation et/ou la compression mécanique qui induit la fermeture des fractures, donc *in fine* la réduction de la perméabilité à l'eau des argilites fracturées, comme observé sur échantillons en laboratoire au jour. L'expérimentation *in situ* CDZ menée par le passé dans le Laboratoire souterrain (compression d'une surface d'une paroi de galerie et hydratation de la zone d'argilites endommagées au droit de cette surface) a également été correctement reproduite, avec des hypothèses simplifiées. Des prochaines études concerneront l'évaluation fine de la migration du gaz dans des argilites auto-colmatées.

LES CONTENEURS DE STOCKAGE DE DÉCHETS HA ET MA-VL

LA MISE EN FABRICATION DES POSTES DU FUTUR PROTOTYPE DE L'ATELIER DE CONDITIONNEMENT DES COLIS DE STOCKAGE DE DÉCHETS HA

TÉMOIGNAGE
FRANÇOIS
VASSALLO



Le conditionnement des colis primaires de déchets de haute activité (HA) en colis de stockage (CS) se fera dans un bâtiment nucléaire, dit EP1, situé dans la zone Descenderie. Les colis primaires HA seront mis dans des conteneurs en acier non allié bas carbone comportant un corps et une tête qui sera soudée au corps. Le conteneur de stockage a une fonction d'étanchéité : garantir l'absence d'arrivée d'eau sur le colis primaire tant que la radioactivité (c'est-à-dire la température) est encore suffisamment élevée, soit une durée de l'ordre de plusieurs centaines d'années. La qualité de la soudure fait partie de la démonstration de l'atteinte de cette fonction. La fiabilité du procédé de conditionnement envisagé sera démontrée *via* la réalisation d'un atelier prototype représentatif des contraintes d'exploitation en milieu nucléarisé.

L'année 2020 a été marquée par la conception et le lancement en fabrication des machines qui composeront cet atelier dont les objectifs sont :

- approvisionner et fabriquer les postes constituant l'atelier ;
- procéder aux essais de réception de chacun des postes ;
- qualifier les postes et les modes opératoires de conditionnement des colis de stockage de déchets HA ;
- qualifier le process de conditionnement des colis de stockage de déchets HA dans sa totalité ;
- assurer l'exploitation du matériel pour réaliser des essais et des maquettes ;
- assurer l'entretien et la maintenance de l'atelier.

Cet atelier sera composé des moyens de fabrication et de contrôle suivants :

- un poste de mesure de magnétisme et démagnétisation avant soudage des composants des colis de stockage afin de limiter les risques de déviation du faisceau d'électrons en cours de soudage ;
- une machine de soudage par faisceau d'électrons, incluant notamment une nacelle de transfert des colis de stockage, un système de positionnement et de rotation du colis, un dispositif de pompage au vide de l'enceinte de soudage et le canon à électrons ;
- un poste de détensionnement local par induction pour la soudure du couvercle sur le corps du colis de stockage et son système de positionnement des colis de stockage ;
- un poste d'usinage du bourrelet de la soudure et son système de positionnement et de maintien des colis de stockage ;
- un poste de contrôles non destructifs par ultrasons (TOFD) et courants de Foucault (CF).

À fin 2020, les études de conception de l'ensemble des postes ont été quasiment achevées. Ainsi, les fabrications des machines de soudage par faisceau d'électrons et de traitement thermique par induction ainsi que du dispositif de contrôle non destructif ont été lancées par Cegelec CEM. L'été 2021 marquera les premières réceptions usine de ces machines, ainsi que l'accessibilité au local qui accueillera le démonstrateur. D'ici la fin de l'année 2021, le démonstrateur sera entièrement opérationnel et réceptionné pour permettre le démarrage de la phase de qualification.



Vue représentative de l'atelier prototype de conditionnement des colis de stockage de déchets HA



Photographie de la machine de soudage par faisceau d'électrons de la tête d'un conteneur de stockage de déchets HA sur le corps du conteneur

DES ESSAIS DE TENUE À L'INCENDIE DE CONTENEURS DE STOCKAGE DE DÉCHETS MA-VL

Afin d'évaluer précisément les conséquences d'une agression thermique sur les colis primaires contenus dans les conteneurs de stockage de déchets MA-VL en béton armé, et ainsi accroître la maîtrise du risque incendie en exploitation, quatre essais d'incendie ont été réalisés en 2020, en collaboration avec l'Ineris, sur différents modèles de conteneur de stockage à l'échelle 1. Les conditions aux limites appliquées sont celles requises par la courbe de la norme ISO 834 en vigueur pour la tenue au feu des



FRANÇOIS VASSALLO

Ingénieur conception et process de conditionnement des conteneurs de stockage de déchets HA, Service Ingénierie des Conteneurs de Stockage, Direction de l'Ingénierie

Le marché sur l'atelier démonstrateur du conditionnement des colis de stockage des déchets HA, engagé il y a deux ans, se concrétise désormais chaque jour davantage. Cette année 2020 a été tout particulièrement marquée par des essais de faisabilité techniques et des réceptions de machines. Cela matérialise physiquement l'avancée du projet d'atelier, qui ne va cesser de s'accélérer au cours des mois à venir jusqu'à sa finalisation prévue en 2021.

Cette prochaine étape est parfaitement en phase avec l'avancée du projet de centre de stockage Cigéo, puisque nous serons en mesure d'exploiter le démonstrateur et d'apporter des réponses techniques sur le conditionnement des colis de stockage de déchets HA à l'Autorité de sûreté nucléaire et son bras technique l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire tout au long

de l'instruction du dossier de DAC prévu d'être remis en 2022. Pour ce dernier, nous apporterons déjà dans les pièces afférentes des éléments de démonstration probants suffisants sur la capacité de réaliser le conditionnement. L'atelier prototype nous permettra d'apporter une démonstration intégrée.

D'ores et déjà, nous nous apercevons que ce démonstrateur apporte aussi des points d'optimisation de la définition des équipements prévus dans le bâtiment nucléaire de réception et de conditionnement des colis. Des améliorations ont déjà été relevées lors des essais de réception. L'exploitation de l'atelier permettra de confirmer et de faire évoluer les choix techniques prévus pour le centre de stockage Cigéo, ce qui est un processus normal pour ce type d'installation.



Photographie d'un conteneur de stockage de déchets MA-VL en configuration d'essai de tenue à un incendie externe (essai au feu)



Photographie de l'essai de manutention d'un conteneur de stockage de déchets MA-VL après un essai au feu



Photographies de l'état interne des conteneurs de stockage de déchets MA-VL après un essai au feu : conteneur de stockage avec fibres polypropylène (en haut) et sans fibre (en bas)

tunnels à gabarits réduits. L'objectif est de mesurer l'évolution thermique du système soumis à un incendie de référence enveloppe atteignant des températures de 945 °C pour les trois essais d'une durée de 60 min, et de 1049 °C pour l'essai d'une durée de 120 min. La représentativité des sollicitations retenues résulte de la reproduction de la configuration géométrique et physique de l'installation souterraine du projet de centre de stockage Cigéo.

Pour chaque essai, deux critères de performance ont été retenus pour caractériser le comportement au feu des conteneurs de stockage. Ils correspondent à l'aptitude du conteneur de stockage, d'une part à conserver une résistance mécanique suffisante pour pouvoir être manipulé et évacué de l'installation après un incendie sans risque de rupture, et d'autre part à protéger suffisamment les colis primaires de la température atteinte lors de l'incendie. L'objectif principal des essais menés en 2020 a donc consisté à démontrer l'atteinte de performances de résistance mécanique au feu des conteneurs de stockage en béton armé. En complément, l'évolution des températures internes aux colis de stockage a été mesurée et, pour l'un des quatre modèles de conteneur de stockage, l'influence de la présence de fibres de polypropylène dans la composition du béton sur l'écaillage a été évaluée.

Les résultats des quatre essais ont montré un bon comportement au feu des conteneurs de stockage et leur capacité de protection thermique des colis primaires. Les observations visuelles des conteneurs et des opérations de manutention au pont et avec un chariot à fourches après les essais ont montré que les conteneurs de stockage en béton avaient conservé une structure suffisamment résistante pour pouvoir être manipulés et évacués de l'installation dans des conditions satisfaisantes, après extinction de l'incendie. Enfin, les essais de comportement au feu des différentes formulations de conteneurs de stockage, avec et sans fibres polypropylène, ont mis en évidence l'intérêt de ces fibres pour réduire de façon efficace l'écaillage d'un béton haute performance.

LES OUVRAGES SOUTERRAINS

GALERIES ET ALVÉOLES DE STOCKAGE DE DÉCHETS MA-VL

La faisabilité technique de méthodes de creusement pour l'industrialisation de la réalisation des intersections et des carrures

L'industrialisation des opérations de creusement permet, par l'emploi de solutions mécanisées, d'atteindre différents objectifs opérationnels tels que la sécurisation des activités, le cadencement des opérations et potentiellement la réduction de l'endommagement de la roche hôte au pourtour des ouvrages induit par l'excavation. L'Andra poursuit donc une veille technologique avec les industriels spécialisés dans la conception et l'emploi des tunneliers afin de rechercher les optimums techniques et de vérifier leur adéquation en tant que solution de référence pour la réalisation des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo.

Les intersections/carrures dans le centre de stockage Cigéo (galerie/galerie, galeries/alvéoles de stockage, plus particulièrement les alvéoles de stockage de déchets MA-VL) sont des ouvrages spécifiques nécessitant des opérations de démontage de voussoirs lourdes et peu communes dans les travaux souterrains, avec une sur-excavation importante de l'amorce. Cette opération ne présente pas de points rédhibitoires *stricto sensu*, mais il convient de bien en définir son industrialisation. En 2020, l'Andra a consulté des fabricants de tunneliers et des bureaux d'études pour réaliser une étude de faisabilité permettant de définir des méthodes de réalisation industrielle de ces intersections (carrures) en T pour les galeries réalisées au tunnelier.

L'étude réalisée a permis de définir des méthodes et des matériels industriels à mettre en œuvre, ainsi qu'un domaine de délai de réalisation de ces ouvrages, cohérent avec les hypothèses retenues à ce jour. Trois solutions techniques différentes ont été proposées par les deux entreprises retenues pour cette étude par l'Andra. La faisabilité technique de la solution de base proposée a été démontrée et de nouvelles pistes d'optimisation qui feront l'objet d'études complémentaires ont été définies.

Des tests de revêtements compressibles en surface en amont de leur expérimentation dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

Après une première expérimentation (expérimentation TPV) dans le Laboratoire souterrain ayant montré que la mise en place d'éléments compressibles à l'extrados conduit à une réduction des efforts dans les anneaux de voussoirs, leur faisabilité technique et leur efficacité vis-à-vis de la réduction des efforts dans le revêtement en béton est désormais étudiée dans le cadre des méthodes de construction traditionnelle (excavation, mise en place d'un soutènement provisoire puis mise en place d'un revêtement définitif souvent coulé en place). Tel est l'objet de l'expérimentation RTC (Revêtement traditionnel avec couche compressible) engagée en 2019.

La première phase de RTC s'est déroulée en 2019-2020 en surface. Elle a consisté en la vérification de la faisabilité technique de l'intégration de plaques compressibles préfabriquées pour la réalisation d'un soutènement/revêtement associée à une méthode de creusement conventionnelle. Le principe consiste à intégrer les panneaux compressibles (15 cm d'épaisseur) en sandwich entre une couche de béton projeté (20 cm) et une couche de béton coulé (50 cm). Trois types de matériaux compressibles, disponibles sur le marché pour d'autres applications, ont été testés : ciment avec polystyrène expansé, mousse de verre, et ciment avec billes de verre. Il en a été de même pour différentes méthodes de fixation des plaques : remplissage des interfaces, spittage et mixte. Les résultats ont montré la faisabilité technologique de ce type de mise en œuvre et mis en évidence des adaptations nécessaires pour une application dans le centre de stockage Cigéo (développement de panneaux courbes, fixation des panneaux avec des chevilles/spits, optimisation des différents paramètres contrôlant la qualité de remplissage de l'interface roche/panneau tels que les caractéristiques du mortier d'injection, du dispositif d'injection, etc.).



Photographies de panneaux compressibles :
(a) tapissage de panneaux et (b) coulage du béton et démontage



Photographies des panneaux compressibles après coulage du revêtement pour les trois différents matériaux testés (ciment/billes de verre, ciment/polystyrène expansé, mousse de verre)

Après une phase préparatoire en 2020, la deuxième phase de RTC sera réalisée en 2021 dans le Laboratoire souterrain avec la mise en œuvre, dans des conditions réelles d'un chantier en souterrain, des différents types de panneaux retenus sur tout le pourtour de la galerie GCS par l'entreprise Eiffage TP en charge des excavations. Le retour d'expérience sur cette mise en œuvre proche d'une mise en œuvre « industrielle » permettra de retenir les matériaux les plus adéquats qui seront utilisés lors de la construction du revêtement de la future galerie GRD6 (expérimentation OMA : démonstrateur d'un alvéole de stockage de déchets MA-VL) prévu fin 2021 / début 2022.

Une approche fiabiliste de la rupture du revêtement en béton

Afin d'évaluer la robustesse du dimensionnement du revêtement en béton, en particulier compressible, une approche fiabiliste, complémentaire aux approches déterministes menées sur la base de modèles élasto-visco-plastiques pour représenter le comportement mécanique du Callovo-Oxfordien, a été mise en œuvre dans le cadre d'une collaboration avec l'université d'Orléans. L'approche fiabiliste proposée est particulièrement adaptée au comportement mécanique différé (c'est-à-dire dépendant du temps) du Callovo-Oxfordien. Un méta-modèle Kriging modifié à partir du modèle AK-MCS (*Active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo Simulation*) a été développé afin d'évaluer l'effet de l'incertitude des paramètres du comportement différé du Callovo-Oxfordien, ainsi que de leur variabilité spatiale, sur la probabilité d'atteinte de la contrainte admissible de dimensionnement du revêtement en béton d'un alvéole de stockage de déchets MA-VL (34,2 MPa selon l'Eurocode pour un béton de type C60 en voussoir).

L'analyse fiabiliste a montré que la probabilité d'atteinte de la contrainte admissible de dimensionnement durant la période d'exploitation est très faible (< 0,11 %) et d'autant plus réduite que la variabilité spatiale des paramètres est prise en compte. Elle a montré la robustesse du dimensionnement actuel, en soulignant par ailleurs le rôle important du matériau compressible sur l'évolution des contraintes dans le revêtement.

ALVÉOLES DE STOCKAGE DE DÉCHETS HA

Un démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA dans le Laboratoire souterrain pour tester un dispositif de prélèvement de gaz et d'inertage

Dans le cadre de la maîtrise de l'atmosphère interne d'un alvéole de stockage de déchets HA, il est envisagé un contrôle de cette atmosphère pendant la phase d'exploitation, *via* un dispositif de prélèvement de gaz et d'inertage, notamment à l'intérieur de l'alvéole. La faisabilité de mise en œuvre de ce dispositif a été démontrée pour la première fois en 2020 avec la réalisation du démonstrateur d'alvéole de déchets HA AHA1607 d'une longueur de 80 m.

Le principe retenu à ce stade des études est la pose en extrados du chemisage de tubulures en acier non alliées vissées entre elles. La réalisation du démonstrateur a permis de vérifier la capacité

à leur mise en place en extrados du chemisage de l'alvéole, sans les endommager durant le fonçage de ce dernier. La faisabilité d'injection d'un gaz inerte à l'intérieur de l'alvéole a été vérifiée, et ce de manière enveloppe, c'est-à-dire sans une étanchéité à l'eau de chaque tubulure installée. Ce démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA continuera à être exploité pour estimer une fréquence d'inertage permettant le maintien de la concentration en oxygène en deçà de 1 %. Un procédé de limitation des échanges gazeux par injection périphérique de la tête d'alvéole sera également testé dans un second temps.

Cette expérimentation s'est également inscrite dans la poursuite de la démarche de qualification des dispositifs de mesure envisagés pour la surveillance des alvéoles de stockage de déchets HA et notamment des travaux d'optimisation de la méthodologie de pose des fibres optiques pour les mesures de température et de déformation, en prenant en compte la présence des tubulures du dispositif d'inertage/prélèvement de gaz sur les 80 m du démonstrateur. Les données complémentaires acquises permettront également de consolider la méthode de passage entre la mesure répartie de déformations orthoradiales et l'ovalisation du chemisage. À ce jour, l'ensemble des capteurs à fibre optique est opérationnel.

Pour le suivi de la température, l'extrados du chemisage a été équipé sur toute sa longueur de trois fibres optiques de mesure répartie de température sur trois génératrices. Trois sondes de température PT100 ont été également positionnées sur la génératrice supérieure pour caler les mesures réparties par fibres optiques. Cette instrumentation a notamment permis de déterminer la qualité de la cimentation du vide annulaire avec le suivi du front de propagation du coulis depuis le fond de l'alvéole vers la galerie qui s'est traduit par une augmentation de température d'environ 1 à 1,5 °C.



Photographies illustrant la réalisation du démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA AHA1607 : en haut à gauche, l'intrados de l'alvéole après creusement (trou nu) ; en bas, la pose des tubulures d'inertage/prélèvement de gaz sur le chemisage ; en haut à droite, la pose de l'instrumentation lors de la mise en place du chemisage



JOHAN BERTRAND

Ingénieur R&D en instrumentation, Service Mécanique des fluides et solides, Direction de la Recherche et Développement

Les démonstrateurs technologiques développés au Laboratoire souterrain permettent de tester et de qualifier en conditions *in situ* les performances de dispositifs de mesures pour la surveillance du centre de stockage Cigéo.

Le programme de démonstrateurs d'alvéole de stockage de déchets HA mené depuis plus de 10 ans a permis progressivement d'améliorer la mise en œuvre des capteurs à fibres optiques en prenant en compte les évolutions et optimisations du concept d'alvéole, afin de gagner en temps de pose tout en garantissant leur protection et la durabilité de la mesure. Pour exemple, la mise en œuvre des dispositifs d'inertage sur le démonstrateur AHA1607 a conduit à revoir la méthodologie de mise en œuvre de l'instrumentation pour gagner en temps de pose tout en limitant la co-activité des différentes interventions menées sur les tronçons

de chemisage au cours de leur fonçage. Sur une chemise classique, la durée de la pose d'une fibre optique est ainsi passée de 30 min à 10 min.

Le retour d'expérience et le suivi de l'instrumentation mise en place sur les différents démonstrateurs, ainsi que le développement d'outils de traitement et de suivi des mesures dédiés, permet notamment désormais une mise en fonctionnement plus rapide de la chaîne de mesures. Avec le démonstrateur AHA1607, toutes les fibres étaient ainsi opérationnelles avant l'injection du coulis en extradros du chemisage, ce qui a permis d'avoir un suivi en temps réel de l'injection et de disposer d'une information indirecte sur la qualité du remplissage, au travers de la mesure de l'élévation de température.



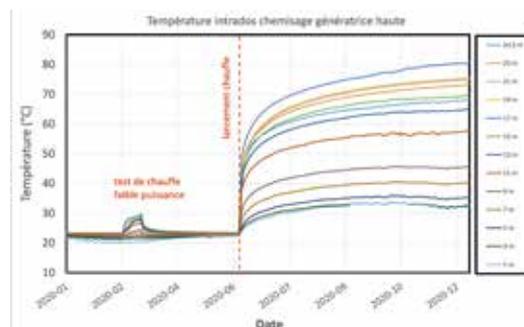
Démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA AHA1607 : évolution des températures mesurées par les capteurs à fibre optique en Raman-DTS lors de l'injection du matériau de remplissage dans l'espace annulaire pour chacune des génératrices (en vert, au fond du démonstrateur ; en rouge, à mi-longueur ; en bleu, en tête)

La mise en chauffe d'un démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA avec présence du coulis cimentaire en extradros du chemisage

La chauffe du démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA ALC1605, de 25 m de longueur, creusé fin 2018 et comportant un coulis cimentaire en extradros du chemisage a démarré en juin 2020, grâce à cinq sondes chauffantes positionnées entre 10 et 25 m de la galerie d'accès. L'objectif de l'expérimentation est d'évaluer l'effet d'une sollicitation thermique sur (i) le comportement thermo-mécanique du chemisage et (ii) le comportement thermo-hydro-mécanique (THM) de la roche en champs proche et lointain, par comparaison avec ce qui a été observé sur un précédent démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA chauffant ALC1604 en 2013, mais sans la présence du coulis cimentaire en extradros du chemisage.

Le chemisage a été instrumenté en intrados et en extradros, en zone chauffée et en zone non chauffée, pour suivre son comportement thermomécanique. Une température maximale de 80 °C a été atteinte fin 2020 au niveau de la génératrice supérieure. Les premières mesures confirment une augmentation du chargement radial du chemisage avec la chauffe (phénomène déjà observé sur les expérimentations thermiques précédentes, à échelle 1 comme à échelle réduite) du fait de l'expansion thermique de la roche.

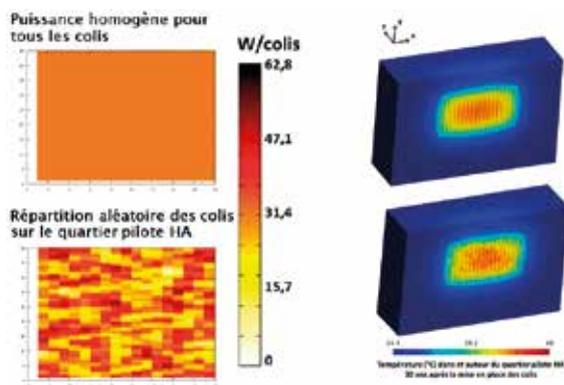
L'instrumentation périphérique en forage autour du démonstrateur a permis de suivre l'évolution des champs de pression interstitielle et de température de la roche sous l'effet de la chauffe. Comme dans les expérimentations thermiques précédentes, une augmentation de la pression interstitielle avec la température a été observée du fait de la différence de coefficient d'expansion thermique de l'eau et du squelette solide de la roche. Cette surpression thermique se dissipe un peu plus rapidement dans le plan horizontal de l'alvéole du fait, notamment, de l'anisotropie des propriétés thermiques et, dans une moindre mesure, hydrauliques de la roche.



Démonstrateur chauffant d'alvéole de stockage de déchets HA ALC1605 : illustration de l'évolution de la température en face interne du chemisage à différentes distances à partir de la galerie d'accès

Une approche statistique de la variabilité de la puissance thermique des colis de stockage de déchets HA dans les quartiers HA en support au dimensionnement thermique

Le dimensionnement thermique (T) et thermo-hydro-mécanique (THM) des quartiers de stockage de déchets HA est fondé sur une puissance thermique moyenne des colis. Pour bien évaluer la robustesse de ce dimensionnement vis-à-vis de la variabilité de la puissance thermique des colis, des analyses de sensibilité ont été réalisées en 2020 par simulation numérique avec des modèles T et THM couplés en 3D en effectuant des tirages aléatoires de répartition des puissances thermiques dans les alvéoles. Les résultats montrent qu'une distribution aléatoire de puissance thermique des colis dans



Évaluation de la robustesse du dimensionnement thermique des quartiers de stockage de déchets HA par analyse statistique de la distribution des puissances thermiques dans les alvéoles de stockage : à gauche, illustrations de schémas de distributions spatiales de puissance thermique (W/colis) dans le quartier pilote HA ; à droite, visualisation de la distribution de température (°C) dans et autour du quartier pilote HA pour une distribution aléatoire de la puissance thermique des colis (résultats de simulation numérique à $t = 30$ ans après la mise en place des colis)

le quartier pilote HA ne remet pas en cause le dimensionnement, et indique par ailleurs une marge supplémentaire par rapport au critère THM retenu du fait des effets de bord de quartier (qui ne sont pas pris en compte de manière conservatrice dans le dimensionnement). Physiquement, les « points chauds », liés à des colis ou groupes limités de colis plus exothermiques que la moyenne, sont atténués du fait des gradients de température (et donc des flux de chaleur) induits par les différences de puissance thermique.

La fabrication additive d'un prototype à l'échelle 1/2 d'un chemisage d'alvéole de stockage de déchets HA innovant en composite géopolymère à base d'argilites du Callovo-Oxfordien

La valorisation des argilites du Callovo-Oxfordien dans la fabrication de composites géopolymères, susceptibles de remplacer certains composants métalliques comme le chemisage des alvéoles de stockage de déchets HA, s'inscrit dans une logique prospective et de progrès continu. Elle répond à des enjeux opérationnels comme le développement de nouveaux matériaux « neutres » vis-à-vis du fonctionnement du stockage et la réduction de l'impact environnemental (utilisation d'une partie des verses d'argilites excavées).

Le développement de matériaux composites est essentiellement basé sur l'optimisation et la compréhension des interactions et interfaces du couple matrice/fibres. Afin de déterminer les formulations optimales répondant au cahier des charges du chemisage d'un alvéole de stockage de déchets HA et de comprendre les mécanismes et phénomènes sous-jacents permettant de proposer des formulations pertinentes, différents ajouts et fractions massiques de métakaolin, de fibres de verre et de wollastonite ont été testés dans le cadre d'une thèse issue de l'appel à projets de thèses Andra 2017¹ et qui s'est achevée en 2020. Un large panel de compositions

TÉMOIGNAGE
NATHALIE
TEXIER-MANDOKI



¹ Thèse *Formulations de composites à base de liants basse température type géopolymère à base d'argilite et de différents renforts : réalisation d'une pièce par fabrication additive* de Julien Archez, soutenue à l'université de Limoges le mercredi 25 novembre 2020.



NATHALIE TEXIER-MANDOKI

Ingénieure matériaux, Service Colis et Matériaux, Direction de la Recherche et Développement

Dans le cadre des actions prospectives d'optimisation du stockage, la thématique « matériaux non métalliques » pour le chemisage des alvéoles de stockage des déchets HA a pour objectif d'explorer de nouvelles solutions « matériaux » pouvant remplir à la fois les exigences de propriétés mécaniques du composant et offrir une inertie chimique vis-à-vis des autres matériaux de l'alvéole.

Les géopolymères, matériaux synthétisés par activation alcaline d'une source alumino-silicatée, par exemple les argilites du Callovo-Oxfordien, peuvent répondre à cette recherche d'inertie chimique mais possèdent un comportement fragile. Afin d'obtenir des propriétés mécaniques satisfaisantes, il a été envisagé de développer un composite en intégrant des fibres à la matrice géopolymère.

Cela nécessite d'optimiser les formulations, en particulier le couple matrice/fibres, ainsi que la mise en œuvre de ces nouveaux matériaux. Dans ce but, les travaux de thèse de Julien Archez ont été menés en cotutelle à l'IRCER (Institut de recherche sur les céramiques Limoges) pour la partie formulation et au laboratoire Navier de l'ENPC pour la mise en œuvre. Cette collaboration a abouti à un dépôt de brevet commun IRCER/ENPC/Andra FR1905248 intitulé « Formulations et mise en œuvre de compositions géopolymères renforcées avec des fibres minérales et mises en forme associées ». En fin de thèse, un prototype échelle 1/2 a été réalisé avec succès par fabrication additive. Cela nous ouvre des perspectives passionnantes pour aller jusqu'à la réalisation d'un chemisage à l'échelle 1 et tester ses performances mécaniques.



Photographie d'un prototype à l'échelle 1/2 d'un chemisage d'alvéole de stockage de déchets HA en géopolymère réalisé en laboratoire par fabrication additive

a été réalisé avec des viscosités et des temps de prises compatibles avec différents procédés de mise en forme (coulage et fabrication additive). Les propriétés mécaniques des composites obtenus varient de 22 à 101 MPa en compression et de 3 à 20 MPa en flexion. Ces propriétés sont stables dans le temps en fonction de l'humidité, à température ambiante. Ces données, associées aux caractéristiques structurales et microstructurales, ont permis de montrer que l'ajout de wollastonite améliore les réactions de polycondensation tout en augmentant la viscosité du mélange réactif, ainsi que ses propriétés mécaniques, pendant que les fibres de verre induisent un encombrement stérique limitant les fissurations.

La mise en forme des composites développés a ensuite été testée par coulage et par fabrication additive (extrusion) à l'échelle laboratoire. L'adaptation de la formulation, par modification du type et de la quantité de source aluminosilicate et l'ajout de renforts, a permis d'obtenir des temps de prise et des valeurs de viscosités variables, adaptés aux deux types de mise en œuvre. Par coulage dans un moule, il est possible de réaliser des objets de formes relativement complexes à différentes échelles (diamètres de 5 ou 10 cm). Pour l'extrusion, des études spécifiques ont été menées sur l'affaissement et le retrait *via* l'adaptation de la formulation (taux de métakaolin, de renforts ou ajout d'aluminosilicates non réactifs). La vitesse d'impression est également un paramètre à maîtriser pour permettre l'accroche entre les différentes couches imprimées. Bien que la mise en forme par coulage conduise à une microstructure isotrope à la différence de la mise en forme par extrusion du fait de l'orientation des fibres, aucune différence notable des propriétés d'usage n'a été constatée : elles sont de l'ordre de 89 MPa avec l'ajout de 10 % massique de wollastonite et de 2 % massique de fibres de verre. En fin de thèse, un prototype échelle 1/2 a pu être réalisé par fabrication additive (35 cm de diamètre, 45 cm de hauteur).

LES LIAISONS SURFACE-FOND

LA FAISABILITÉ TECHNIQUE DU CREUSEMENT DES PUIITS AVEC LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE « TUNNELIERS VERTICAUX »

Un travail de veille technologique mené par l'Andra a mis en évidence l'intérêt d'évaluer la faisabilité du creusement des puits du centre de stockage Cigéo par la combinaison de deux nouvelles méthodes développées par la société Herrenknecht, faisant appel aux technologies VSM (*Vertical Shaft sinking Machine*) et SBR (*Shaft Boring Roadheader*), plus communément appelées « tunneliers verticaux ». Ces méthodes permettraient de réduire la présence d'opérateurs au front lors du creusement et de ce fait le temps d'exposition aux risques inhérents au travail en élévation.

En 2020, l'étude de faisabilité confiée par l'Andra aux sociétés Herrenknecht, DMC et DEP Engineering a permis de montrer qu'il n'y avait pas d'impossibilité technique à la réalisation des puits de Cigéo par la combinaison de ces méthodes. Bien qu'elles soient encore peu utilisées dans le monde (90 fois pour le VSM et quatre fois pour le SBR), elles pourraient à l'avenir devenir les méthodes de référence pour la réalisation des puits, comme cela fut le cas avec les tunneliers pour la construction des galeries souterraines par le passé.



Photographie d'un exemple de tunnelier vertical

TÉMOIGNAGE
CYRIL
BRIANCOURT

L'INSTALLATION D'UN BANC D'ESSAI ÉCHELLE 1 À FRONCLES (HAUTE-MARNE) POUR TESTER LES SYSTÈMES DE FREINAGE DU FUNICULAIRE DE TRANSFERT DES COLIS DE STOCKAGE AU FOND PAR DESCENDERIE

Le système de freinage de secours embarqué sur le véhicule de transport des hottes dans la Descenderie est un élément de sécurité important. Il est constitué d'un chariot de freinage muni de six freins d'arrêt d'urgence (pincés FAU) et d'un frein d'arrêt d'ultime secours (AUS), et complété en fond de fosse par deux butoirs (BUT). Un banc d'essai échelle 1 a été construit au jour afin de qualifier les dispositifs de freinage, en support au dossier d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo.

Le programme d'essais comprend une première phase d'essais unitaires visant à qualifier les trois systèmes de freinage indépendamment au cours d'essais élémentaires, réalisée en 2019,

puis dans une logique de montée en maturité technologique, des essais dans un prototype échelle 1 intégrant ces trois systèmes.

Les travaux de mise à niveau d'une halle couverte à Froncles devant accueillir le banc d'essai ont été réalisés en 2020, suivis du montage du banc d'essai lui-même avec notamment la création d'une rampe semi-enterrée de 37 mètres dont 20 mètres sous le niveau du sol, représentative de la gare basse du funiculaire du centre de stockage Cigéo avec ses équipements d'arrêt d'urgence. En parallèle, les différentes pièces du châssis du chariot ont été réalisées par l'entreprise Poma, spécialisée dans la fabrication de systèmes de transport par câble, et livrés pour y être assemblés. Les premiers essais des systèmes de freinage débuteront à l'été 2021 (essais dynamiques y compris en configurations dégradées, essais de performances nominales et mini/maxi connues et mesurées sur un tronçon donné, etc. sur chacun des systèmes de freinage ainsi que les enchaînements simulés de systèmes de freinage).



Photographie du prototype échelle 1 préfigurant le funiculaire de descente des colis de stockage dans l'installation souterraine du centre de stockage Cigéo dans sa halle d'essais à Froncles



CYRIL BRIANCOURT

Ingénieur procédé mécanique, Service Études Process Mécaniques, Direction de l'Ingénierie

Les essais des systèmes de freinage du funiculaire, menés dans les locaux du CETIM à Saint-Étienne, ont permis de valider individuellement chaque composant sur maquette et de vérifier leurs aptitudes à fonctionner dans un environnement représentatif du centre de stockage Cigéo. Les résultats obtenus ont permis de conforter les hypothèses retenues en APD et d'en améliorer la conception. Ainsi, les essais de qualification d'adhérence ont permis, pour chacun des systèmes de freinage, de sélectionner plusieurs matières de caractéristiques différentes répondant au critère attendu. Ce panel de matières permet de garantir qu'en cas de défaillance d'approvisionnement ou d'arrêt de production d'un produit sur la période d'exploitation du funiculaire (d'ordre séculaire), des alternatives existent.

Ces essais s'intègrent dans la logique de montée en maturité technologique du funiculaire. La phase suivante qui intègre ces systèmes dans le prototype échelle 1 du funiculaire permettra la validation des performances de freinage sur le banc d'essai nouvellement installé à Froncles et conçu pour être représentatif de la pente de la Descenderie dédiée à la descente des colis de stockage dans une hotte de transport. La réalisation du prototype en 2020 est une étape importante. Les essais devraient se dérouler dans le courant du second semestre 2021 et contribueront ainsi à la demande d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo, en termes d'éléments probants pour la démonstration de la sûreté opérationnelle du funiculaire.

LES OUVRAGES DE FERMETURE

TÉMOIGNAGE
BENOÎT
COCHEPIN



LA SIMULATION DU COMPORTEMENT COUPLÉ HYDRO-CHIMIE-MÉCANIQUE DES SCELLEMENTS

Le principe des scellements repose sur l'utilisation d'un matériau argileux remarquable, l'argile gonflante, qui par sa faible perméabilité à l'eau, sa plasticité élevée, sa capacité à gonfler lorsqu'il se resature, et sa tolérance aux sollicitations mécaniques, hydrauliques et gaz, permet *in fine* de garantir la fonction de limitation de la circulation de l'eau dans le stockage en après-fermeture. Pour contribuer à optimiser la conception des scellements tout en garantissant leur fonction hydraulique sur le long terme, des simulations intégrées mobilisant des couplages multi-physiques ont été réalisées en 2020, avec comme objectif principal de quantifier de manière plus détaillée l'influence des bétons de structure laissés en place sur l'évolution chimique et mécanique de ce matériau gonflant. L'Andra et Amphos21 ont ainsi développé un modèle rendant compte des couplages entre processus hydriques, chimiques et mécaniques (HCM) d'un scellement et permettant de quantifier, à l'échelle de l'ouvrage, la perte éventuelle de gonflement induite par la perturbation alcaline provenant des bétons. Un environnement logiciel capable de simuler les différents processus hydraulique, chimique et mécanique et une stratégie permettant d'intégrer chacune des simulations, habituellement considérées de manière séparée, a été développé par la société Amphos21.

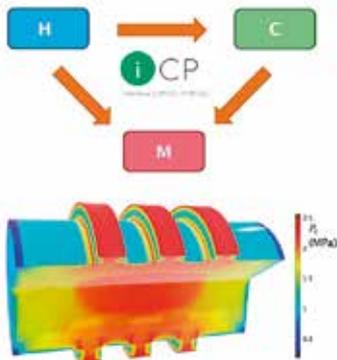
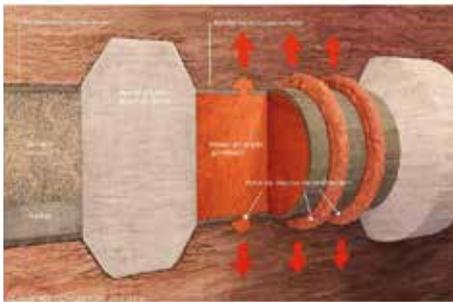


Illustration de la pression de gonflement effective après resaturation exercée par le noyau argileux d'un scellement de galerie sous l'influence de la perturbation chimique induite par les matériaux cimentaires environnants pour une configuration d'un scellement avec massif d'appui en béton : simulation menée avec le logiciel iCP (interface Comsol-Phreeqc) par Amphos21



BENOÎT COCHEPIN

Ingénieur analyse de performance, Service Évaluation et Analyse de Performance, Direction de la Recherche et Développement

Même s'il n'est encore pas possible de simuler au sein d'un unique modèle couplé l'ensemble des processus physico-chimiques intervenant à l'échelle d'un ouvrage de Cigéo comme un scellement, l'émergence des méthodes d'apprentissage supervisées, qui paraissaient inaccessibles il y a encore cinq ans, permet de l'envisager aujourd'hui et demain.

Coordonner de tels projets scientifiques à la pointe de la connaissance et répondant à des objectifs opérationnels très concrets est vraiment très motivant car ils font se rencontrer des spécialistes de domaines très variés (hydraulique, chimie, mécanique) et de disciplines aussi très variées (expérimentation, modélisation, simulation numérique, statistique). Les progrès réalisés sont déjà tangibles et les perspectives qu'offrent des nouveaux modèles basés sur l'intelligence artificielle sont vertigineuses.

La mise en œuvre de tels modèles nécessite des ressources informatiques et numériques performantes pour la résolution de systèmes fortement non linéaires et pour de grandes échelles de temps et d'espace. Afin d'accroître plus encore les capacités de représentation (détail, gestion des couplages, études de sensibilité), l'Andra a initié le développement de méthodes numériques d'intelligence artificielle basées sur l'apprentissage profond et se fondant notamment sur des réseaux de neurones ou des processus gaussiens.

L'OBSERVATION/SURVEILLANCE

LE DÉPLOIEMENT DE TECHNIQUES DE FUSION DES DONNÉES SUR UN DÉMONSTRATEUR D'ALVÉOLE DE STOCKAGE DE DÉCHETS HA DANS LE LABORATOIRE SOUTERRAIN

La gestion d'un nombre important de données de surveillance/observation du centre de stockage Cigéo dès la phase industrielle pilote et *a fortiori* ensuite en lien avec son développement progressif, ainsi que la précision des représentations (simulations) multi-physiques couplées de son évolution phénoménologique, nécessite de mettre en œuvre des méthodes de traitement des données adaptées, afin de disposer d'une information qualifiée, fiable et robuste.

TÉMOIGNAGE
JULIEN COTTON

La technique de fusion de données est l'une de ces méthodes. Elle a été déployée en 2020 sur le démonstrateur d'alvéole HA ALC1605. Elle combine différentes sources de données hétérogènes (mesures *in situ*, métadonnées contextuelles, métamodèles de *machine learning*, mais aussi résultats de simulation) afin d'améliorer la compréhension de l'évolution d'un système physique complexe dans le temps et dans l'espace. En amont de la chaîne de données, la fusion directe combine tous les flux de données brutes avec les métadonnées (par exemple la géométrie des dispositifs et des composants du démonstrateur, les différents types de capteur, les unités de mesure) qui sont autant de paramètres pris en

compte pour la mise en cohérence de toute l'information en 3D (cf. image ci-dessous, a). Plus en aval dans la chaîne, la fusion indirecte requiert quant à elle des modèles. Ceux-ci sont basés soit sur la physique (PBM pour *Physics Based Models* : PDEs *modelling*, CFD, etc.), soit sur les mesures (DDM pour *Data Driven Models* : intelligence artificielle, *machine learning*), ou encore sur la combinaison hybride des deux approches (PBM + DDM). Ces techniques permettent de décrire des champs continus et peuvent ainsi être utilisées pour compléter spatialement et temporellement l'information apportée par les dispositifs de surveillance (cf. image ci-dessous, b).

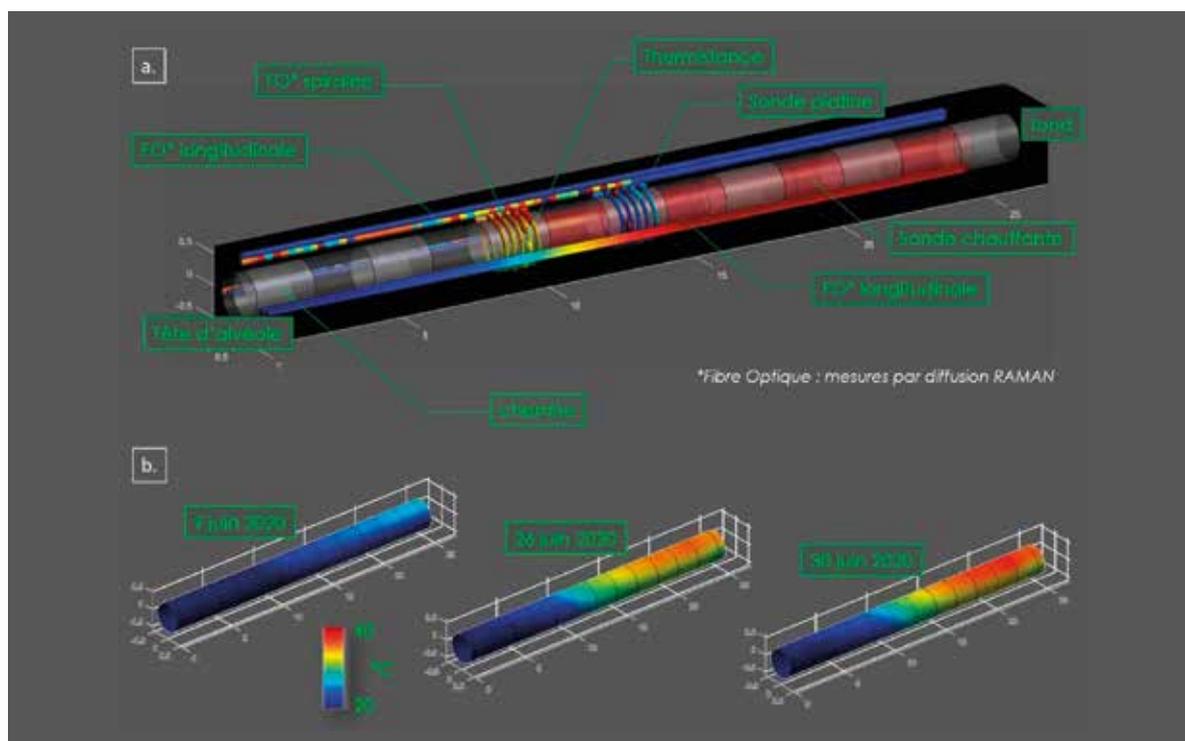


Illustration de la fusion de données directe (a) et indirecte (b) mise en œuvre sur le démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA ALC1605 au Laboratoire souterrain : reproduction du champ 3D d'élévation transitoire de température dans et autour du démonstrateur



JULIEN COTTON

Ingénieur traitement des données – Datamining, Service Évaluation et Analyse de Performance, Direction de la Recherche et Développement

Notre objectif est de disposer d'une interprétation précise et fiable des données qui remonteront de la surveillance du centre de stockage Cigéo, en particulier les alvéoles de stockage. En se basant sur les expérimentations conduites au Laboratoire souterrain d'une part, et sur les progrès de l'intelligence artificielle et du *machine learning* d'autre part, nous testons des briques technologiques existantes dans l'industrie et nous les adaptions aux spécificités de la surveillance du centre de stockage Cigéo.

Nous disposons déjà d'un retour d'expérience important et de méthodes au point. La diversité des démonstrateurs

déjà en cours dans le Laboratoire souterrain et à venir nous permettra de poursuivre la mise au point des briques technologiques du futur système de gestion de données de surveillance qui seront mises en œuvre dès la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo.

La science des données a déjà fortement évolué et l'intelligence artificielle offre un champ de progrès très important. Disposer du Laboratoire souterrain comme terrain de développement concret est un atout formidable pour l'Andra et ses partenaires industriels et académiques dans le domaine de la gestion des données.

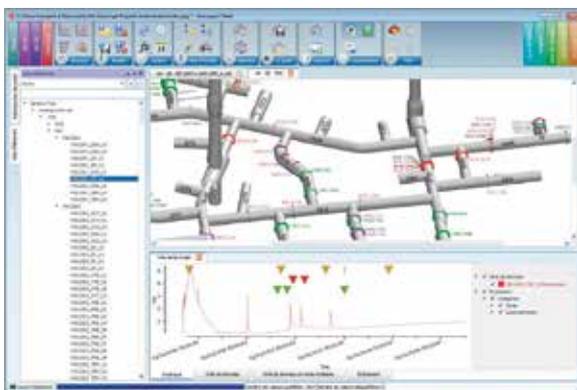
L'APPLICATION DE LA VIRTUALISATION DE SERVEURS AU SYSTÈME D'ACQUISITION ET DE GESTION DES DONNÉES SCIENTIFIQUES (SAGD) DU CENTRE DE MEUSE/Haute-MARNE

Depuis 2003, le Système d'acquisition et de gestion des données scientifiques (SAGD) permet l'acquisition et la consultation des mesures issues des capteurs installés dans le Laboratoire souterrain et en surface (forages, réseau piézométrique, stations environnementales de l'Observatoire pérenne de l'environnement, etc.). Les données acquises en continu transitent par des PC d'acquisition, puis elles sont stockées dans des bases de données hébergées par des serveurs. L'ensemble préfigure ce qui devrait être mis en œuvre dans le centre de stockage Cigéo, toutes proportions gardées. À ce titre, il permet à l'Andra de disposer des compétences et d'un retour d'expérience sur déjà presque 20 ans, qui seront valorisés dans le centre de stockage Cigéo.

Fin 2020, l'Andra et la société Sixense Monitoring² ont procédé au remplacement et la virtualisation des deux serveurs de données du SAGD : le serveur de pilotage du robot de sauvegarde sur bandes et le serveur de tickets, dont les capacités commençaient à être limitées au vu de la volumétrie importante des données à gérer dans un seul châssis physique (2,5 millions de valeurs/jour).

La solution de virtualisation mise en place présente de nombreux avantages :

- cette technologie moderne, performante et évolutive permet de faire fonctionner plusieurs serveurs virtuels sur un seul serveur physique ;
- la mutualisation des capacités de chaque serveur permet de réaliser des économies et de réduire les investissements en infrastructures physiques ;
- les délais de maintenance sont réduits (par exemple, une opération de compression des données prend désormais sept à huit heures, contre 48 heures avec les anciens serveurs).



Exemple de visualisation des données acquises au Laboratoire souterrain par le SAGD via l'outil Géoscope



Exemple de visualisation du tableau de bord de la station météo du Centre de Meuse/Haute-Marne avec l'outil Grafana développé par l'Andra

Le SAGD en quelques chiffres en 2020 :

- plus de 200 centrales d'acquisition de mesures ;
- plus de 25 000 points de mesure ;
- 2,5 millions de mesures enregistrées par jour ;
- plus de 6 milliards de mesures stockées depuis 2003 ;
- 5 700 logbooks (événements associés à un point de mesure).

LE PASSAGE DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE (BIM) DE CIGÉO À SON JUMENT NUMÉRIQUE PHÉNOMÉNOLOGIQUE SUR L'EXEMPLE TEST DE LA THERMIQUE DES ALVÉOLES DE STOCKAGE DE DÉCHETS HA

Un objectif de l'Andra dans le cadre de sa transformation numérique est de développer un jumeau numérique phénoménologique 4D du centre de stockage Cigéo au fur et à mesure de son développement progressif. Outil d'aide à la décision (surveillance, maintenance, etc.), ce jumeau numérique devra fournir à chaque instant des informations sur l'état du fonctionnement phénoménologique du centre de stockage Cigéo, mais aussi des comparaisons avec des résultats de simulation numérique et des prédictions en temps réel.

En 2020, une première étape de construction du jumeau numérique phénoménologique du centre de stockage Cigéo a été franchie sur l'exemple de la thermique d'un alvéole de stockage de déchets HA. Ce travail préliminaire a consisté tout d'abord à mettre en œuvre et tester un processus (cf. images page suivante) séquençant l'extraction, l'adaptation et le maillage d'une géométrie issue de la maquette numérique du centre de stockage Cigéo, puis à réaliser une simulation numérique sur cette base en dehors de la maquette et enfin à projeter en retour les résultats de la simulation (temps/espace) sur la maquette. Les travaux menés ont permis d'appréhender et de traiter les différentes difficultés de gestion ; (i) les interfaces entre les différents outils utilisés (CAO, maillage, code de calcul, etc.) et la multiplicité des formats de fichiers associés ; (ii) les interfaces entre utilisateurs, et donc entre métiers (ingénierie et sciences), avec des niveaux de conceptualisation différents selon le champ d'application ; (iii) les objets issus de la maquette numérique et leur compatibilité

² Sixense Monitoring, entreprise qui propose des services de monitoring pour le BTP, assure la maintenance du SAGD et met à disposition de l'Andra le logiciel Geoscope dans le cadre d'un accord de collaboration signé en 2006.

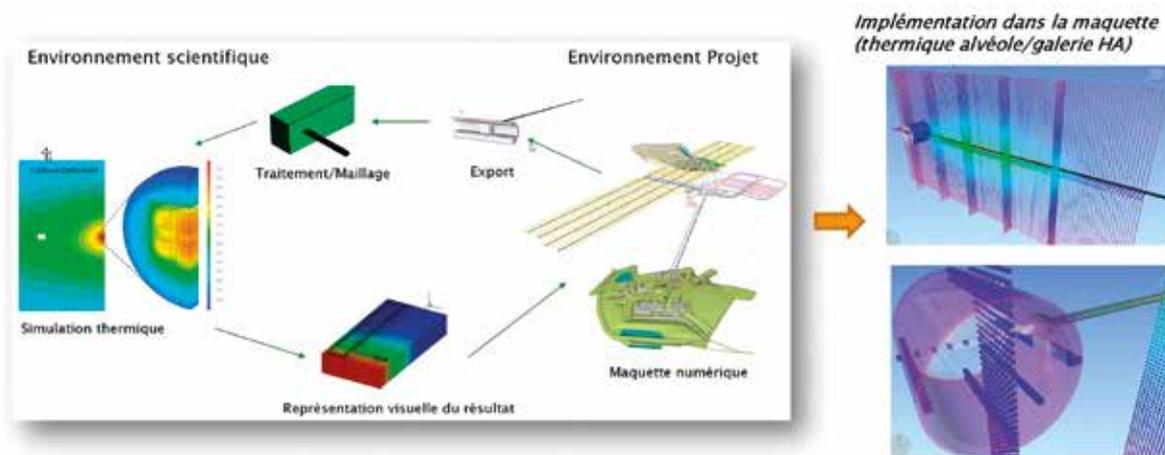


Illustration du passage de la maquette numérique (BIM) de Cigéo à son jumeau numérique phénoménologique sur l'exemple de la simulation thermique d'un alvéole de stockage de déchets HA

dans les codes de calcul (suppression et remplacement éventuel, modification/simplification) ; (iv) les résultats (temps/espace) en vue de leur projection sur la maquette numérique, compte tenu de leur type et de leur volume.

Cette première étape constitue ainsi une base importante pour les futurs travaux de construction du jumeau numérique qui devront traiter des phénoménologies plus complexes, l'intégration de données observées pour permettre la comparaison future avec ceux issus de la simulation numérique, et l'accès, *via* des techniques numériques d'apprentissage, à une information encore plus détaillée et continue d'indicateurs phénoménologiques.

L'ENVIRONNEMENT

LA MODERNISATION DES DISPOSITIFS D'OBSERVATION DE L'OBSERVATOIRE PÉRENNE DE L'ENVIRONNEMENT (OPE)

L'aménagement d'un nouveau bâtiment plus ergonomique et à l'infrastructure plus robuste à la station atmosphérique de Houdelaincourt

Depuis août 2020 et la réception par l'Andra d'un nouveau bâtiment pour la station atmosphérique à Houdelaincourt, l'OPE dispose d'un nouvel outil sur mesure pour réaliser ses observations atmosphériques.

TÉMOIGNAGE
MICHEL
RAMONET



MICHEL RAMONET

Chercheur Cycle du carbone, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), université Paris-Saclay

L'infrastructure de recherche européenne ICOS s'est construite sur l'expérience acquise au début des années 2000 par les différents réseaux de mesure de gaz à effet de serre (GES) déployés dans les pays européens. À partir de cette expertise, des protocoles de mesure ont été établis en vue de l'établissement d'un réseau de mesure des GES cohérent en Europe. Ce travail de définition des protocoles optimaux a été réalisé lors de la phase préparatoire d'ICOS, coordonné par le LSCE (2008-2013). Cette phase préparatoire s'est conclue par une *Demo Experiment* en 2011, avec un déploiement de capteurs de GES dans quatre stations européennes : Mace Head en Irlande, Cabauw aux Pays-Bas, Puijo en Finlande, et l'OPE en France. Parmi ces stations, l'OPE était la seule pour laquelle il a fallu construire toute l'infrastructure, y compris la tour de mesure de 120 m de haut. L'OPE a donc joué un rôle prépondérant, depuis le début des mesures en 2011, pour l'évaluation des protocoles ICOS.

Tout au long de ce process, nous avons donc eu un échange permanent entre le personnel de l'Andra en charge

de la tour ICOS de l'OPE et le personnel du Centre Thématique Atmosphérique d'ICOS au LSCE. Ces échanges entre l'Andra et le LSCE ont été une clé du succès pour la station de l'OPE et sa labellisation acquise en novembre 2017, mais aussi pour le projet ICOS en lui-même qui a bénéficié des travaux pionniers mis en place à la tour OPE pour optimiser les mesures de GES désormais réalisées dans 31 stations européennes.

Le déménagement dans le nouveau bâtiment en 2020 a été une étape importante pour la station de l'OPE qui dispose ainsi d'une infrastructure à la hauteur des enjeux pour inscrire l'OPE dans la durée comme un site de référence du réseau européen de suivi de la composition atmosphérique. La collaboration avec le LSCE se poursuit, en particulier pour le contrôle qualité des observations, et l'échange d'informations pour résoudre les problèmes instrumentaux, et implémenter les jouvences nécessaires dans le cadre du service national d'observation ICOS-France-Atmosphère.



Photographies de la station atmosphérique de l'OPE à Houdelaincourt :
à gauche, photographie aérienne et, à droite, photographie du nouveau bâtiment accueillant des dispositifs de mesure

Cette station, inaugurée en 2011, a vocation à être la référence pour le fond atmosphérique régional autour du centre de stockage Cigéo. Elle vise notamment à caractériser l'état initial des propriétés atmosphériques (météorologie, radiologie, qualité de l'air, composition chimique, teneur en particules, etc.) avant toute construction du centre de stockage Cigéo et de suivre son évolution pendant les phases progressives de construction et d'exploitation du centre de stockage Cigéo. Les différentes mesures atmosphériques sont intégrées dans les réseaux nationaux et internationaux scientifiques et opérationnels de suivi des propriétés de l'atmosphère (Atmo Grand Est, Météo France, ICOS, ACTRIS et IRSN OPERA).

Avec la mise en place progressive des différents systèmes d'observations entre 2011 et 2013, les locaux d'origine étaient devenus sous-dimensionnés et posaient, avec le temps, des problèmes techniques (étanchéité, protection électrique vis-à-vis de la foudre et régulation thermique insuffisante).

Le nouveau bâtiment, avec sa surface agrandie (110 m², contre 36 m² auparavant) et son aménagement intérieur spécifique, permet d'améliorer les conditions de travail et l'ergonomie de la station. Tandis que les analyseurs et préleveurs sont répartis dans trois pièces distinctes et de grande superficie, les principaux éléments techniques sont hébergés dans un local dédié. La robustesse de l'infrastructure a été, dans le même temps, améliorée (protection foudre, réseau électrique et climatisation). Enfin la sûreté, et notamment la protection passive de l'ensemble contre les agressions extérieures, a été renforcée.

Le déploiement de nouvelles sondes multi-paramètres pour la mesure en continu de la qualité des cours d'eau

Dans le cadre de l'OPE, l'Andra a mis en œuvre en 2012 un dispositif de surveillance de la qualité des eaux de cours d'eau, incluant l'installation de six stations instrumentées de mesure en continu. Ces stations étaient constituées initialement de quatre sondes : une sonde multiparamètre, une sonde ISA-GO (nitrates et

carbone organique dissous), une sonde ALgae-Torch (mesure de la chlorophylle) et une sonde pour mesurer les teneurs en HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques). La réalisation d'un bilan annuel des données acquises depuis 2012 a démontré la capacité de ces outils à évaluer la variabilité spatiotemporelle de la qualité des eaux de la zone d'observation de l'OPE ; elle a également permis de proposer des optimisations des paramètres à suivre et des capteurs de mesure de ces paramètres avec des performances suffisantes.

Il ressort que globalement les taux de fonctionnement des sondes multi-paramètres sont très bons quelle que soit la station (> 80 %). En revanche, ceux des autres sondes (suivi du carbone organique, des nitrates, de la chlorophylle et des HAP) ont été particulièrement affectés par des problèmes liés à l'alimentation électrique, à la connectique entre les différents éléments des stations et aux périodes d'étalonnage en usine parfois très long. En outre, il a été constaté une diminution des performances des stations d'année en année sur les 10 ans de déploiement environ.



Photographie d'une sonde multi-paramétrique EXO2(YSI) déployée sur le territoire de l'OPE pour le suivi en continu de la qualité des eaux de cours d'eau

Le suivi de paramètres tels que la température, la conductivité à 25 °C, l'oxygène dissous et la turbidité montre que les performances des capteurs (évaluées en 2011) sont compatibles avec les niveaux mesurés et les amplitudes de variation observées. Pour les autres paramètres, soit l'amplitude de variation est assez faible (cas du pH), soit les mesures sont très bruitées (cas des nitrates et du carbone organique), soit les niveaux mesurés sont très bas (cas de la chlorophylle a et des HAP). Ainsi il apparaît que la sonde ISA-GO ne permet pas de bien observer les variations du milieu en nitrates et en matière organique. Par conséquent, d'autres moyens de mesure de ces deux paramètres doivent être envisagés et évalués. En ce qui concerne la mesure des HAP, leur mesure reste intéressante car des différences entre les stations ont pu être mises en évidence, même si cette mesure n'est que globale. Enfin, l'analyse du suivi de la chlorophylle a montré que cette mesure ne présentait pas un intérêt majeur dans le cas des hydro-systèmes de la zone d'observation de l'OPE.

En 2020, la « structure » des stations de mesures en continu a donc été optimisée sur la base de l'analyse globale du retour d'expérience. Le suivi des teneurs en chlorophylle, et donc du développement des algues, n'a pas été maintenu. Les sondes ISA-GO et AlgaeTorch ont été retirées et la mesure des nitrates et du carbone organique est maintenant assurée par de nouvelles sondes multi-paramètres (sondes EXO2(YSI)), dont les performances sont plus adaptées aux niveaux mesurés et aux amplitudes de variation observées. Ces sondes, déployées sur la zone d'observation de l'OPE, permettent de suivre conjointement les paramètres physico-chimiques tels que la température, la conductivité, l'oxygène dissous, la turbidité, le pH ainsi que les nitrates et la matière organique. De plus, elles possèdent un système d'auto-nettoyage permettant de réduire les dérives dues à l'encrassement des capteurs. Enfin, le changement des capteurs peut être réalisé par l'Andra (technologie *Plug and Play*), ce qui évite de perdre plusieurs semaines de données lors du renvoi des sondes au fabricant pour maintenance et offre plus de flexibilité dans le choix des paramètres à suivre (configuration du suivi de certains paramètres en fonction des saisons). Le suivi des HAP est, quant à lui, toujours assuré par le déploiement de sondes EnviroFlu.

UNE NOUVELLE CARTE PÉDOLOGIQUE PLUS PRÉCISE DE L'OPE

Sur la base de 1 000 sondages pédologiques réalisés au cours du dernier trimestre 2018 et répartis sur 32 000 ha de la zone d'observation de l'OPE, le bureau d'études SOL CONSEIL a décrit neuf nouveaux profils de sols. Les informations ainsi recueillies ont permis de finaliser en 2020 une nouvelle carte pédologique au 1/50 000^e. Elle décrit 29 unités cartographiques de sol, incluant au total 37 types de sols différents, dont la répartition est associée à la topographie, la géologie et l'occupation du sol, agricole ou forestière.

Elle peut se résumer de la façon suivante :

- sur les plateaux sommitaux : des sols très majoritairement forestiers brunifiés à lessivés, décarbonatés à acides, profonds ;



Photographie de présentation de la carte pédologique de l'OPE

- en périphérie des précédents, sur les plateaux et les versants : des sols principalement agricoles, mais aussi forestiers, calcaires ou calcaïques, souvent très caillouteux et peu profonds ;
- dans les dépressions périphériques : des sols majoritairement agricoles, calcaires ou calcaïques, faiblement caillouteux ;
- dans les vallons : des sols colluviaux, très généralement calcaires, caillouteux pour moitié ;
- dans les vallées : des sols alluviaux, calcaires, souvent argileux et humides, avec un excès d'eau marqué lié à une nappe d'eau sous-jacente.

S'il n'y a pas de différence fondamentale avec les types de sols identifiés il y a plus de 10 ans, cette nouvelle carte des sols au 1/50 000^e (cf. photographie ci-dessus), dont la classification respecte les standards de la pédologie actuelle, présente une meilleure justesse par rapport à la carte pédologique disponible jusqu'à présent. En effet, la nouvelle carte permet de passer à un taux de correspondance avec les données ponctuelles existantes de 60-65 % pour la carte de 2008 à 80-90 %. Ce nouvel outil permet ainsi une connaissance précise de la nature des sols dans l'environnement du centre de stockage Cigéo, et constitue une donnée d'entrée importante pour la démarche d'évaluation des services écosystémiques de la zone d'observation de l'OPE.

TÉMOIGNAGE
CATHERINE
GALY



LA POURSUITE DU DÉPLOIEMENT DE L'ANALYSE ÉCOSYSTÉMIQUE DES OBSERVATIONS ENVIRONNEMENTALES SUR LA ZONE D'OBSERVATION DE L'OPE

Afin de répondre aux questions scientifiques, réglementaires ou territoriales liées à l'implantation du centre de stockage Cigéo, l'Andra s'est engagée dans le processus d'analyse écosystémique des observations environnementales réalisées par l'OPE, en incluant la prise en compte des grands équilibres environnementaux et des aspects socio-économiques associés. La démarche d'évaluation des services écosystémiques (SE) doit permettre d'appréhender, traiter, évaluer, structurer et cartographier les données d'observation acquises. À l'échelle de la zone d'observation de l'OPE, il s'agit de définir des indicateurs pertinents et de développer des méthodes de simulations prospectives des évolutions environnementales comme outil de gestion de l'aménagement du périmètre d'installation des infrastructures de surface du projet de centre de stockage Cigéo et plus largement de son territoire d'implantation.

Dans un premier temps, les 25 services écosystémiques présents sur le territoire ont été priorisés d'une part sur des critères de faisabilité de l'évaluation des SE sélectionnés au regard de la disponibilité des données et d'incidences potentielles du centre de stockage Cigéo et, d'autre part, sur des besoins d'accompagnement de l'évolution des pratiques agricoles exprimés par les parties prenantes locales. Cette étape de sélection a permis de prioriser l'évaluation des services écosystémiques fournis par les sols.



Représentation des services écosystémiques présents sur la zone d'observation de l'OPE



CATHERINE GALY

**Cheffe du Service Observatoire pérenne de l'environnement,
Direction de la Recherche et Développement**

En 2020, le programme d'intégration des données de l'OPE a commencé à prendre forme avec le lancement de plusieurs projets qui constituent un noyau autour duquel seront mis en place, dans les années à venir, d'autres projets permettant d'accroître la capacité de l'OPE à développer des indicateurs de suivi des évolutions de l'environnement du territoire d'implantation du centre de stockage Cigéo.

Le concept de l'analyse écosystémique par le prisme des services écosystémiques a déjà été intégré pour documenter les chapitres sur les interrelations entre les milieux dans l'étude d'impact de la demande de Déclaration d'utilité publique du projet de centre de stockage Cigéo. Il s'agit d'un premier pas : les analyses actuelles sont basées sur des modèles simples de type « proxy-occupation des sols ».

Elles seront approfondies avec les projets d'étude attendus au cours des prochaines années, notamment l'utilisation de modèles fonctionnels plus intégratifs.

Il est assez rare, sinon unique, de voir se développer sur un site une dynamique pluridisciplinaire d'optimisation des outils d'évaluation des services écosystémiques, telle que celle engagée par l'OPE. Il est très excitant de voir les projets commencer et les équipes de recherche s'emparer de ce sujet.

L'OPE, et le centre de stockage Cigéo, offrent une opportunité exceptionnelle pour développer une approche écosystémique globale, à la fois académique et opérationnelle, et qui pourra être un exemple pour d'autres projets industriels et le développement durable de leurs territoires d'implantation.

En 2020, trois projets (une thèse et deux post-doctorats) d'évaluation des services écosystémiques fournis par les sols (stockage de carbone, fertilité des sols, production de biomasse, d'azote, flux d'eau bleue et verte, etc.) ont été initiés avec nos partenaires scientifiques (INRAE et université de Lorraine). Ces trois projets ont leurs spécificités propres d'échelles d'investigation (parcelle ou territoire) et de sols cibles (agricole, mixte agricole/sylvicole/urbain), mais ils partagent pour objectifs d'évaluer les bouquets de service rendus par les sols de la zone OPE et de suivre, pour des scénarios d'évolution prospectifs, l'évolution dans le temps de l'offre de ces services du territoire.

LE DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DYNAMIQUE DE REPRÉSENTATION DU CYCLE DES RADIOÉLÉMENTS DANS LES DIFFÉRENTS COMPARTIMENTS DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

Les études de l'impact radiologique qui pourrait résulter du centre de stockage Cigéo se basent sur une connaissance approfondie

du comportement des radionucléides dans l'environnement. Certains radionucléides sont plus susceptibles que d'autres d'intégrer le cycle naturel des éléments à cause de leur analogie chimique avec des nutriments essentiels. C'est le cas des isotopes radioactifs d'éléments comme l'iode, le chlore, le sélénium, le césium (au comportement similaire à celui du potassium). Le modèle dynamique à compartiment TRIPS (*Transfer of Radionuclides In Perennial vegetation Systems*) a été initialement développé dans le cadre du projet AMORAD³ (Amélioration des modèles de prévisions de la dispersion et de l'évaluation de l'impact des radionucléides au sein de l'environnement) pour représenter le cycle du radiocésium en écosystème forestier, en distinguant les formes labiles et non labiles au sein des compartiments fonctionnels du sol et de la végétation.

Des travaux menés en 2020 en coopération avec EDF R&D dans le cadre de l'accord de partenariat de recherche Andra-EDF R&D ont conduit à améliorer le modèle pour le chlore 36. La simulation explicite de la distribution des radionucléides dans le sol et la végétation et la quantification des temps de résidence

³ Le projet AMORAD, initié en 2013, rassemble sous la coordination de l'IRSN treize partenaires dont cinq universités françaises (Toulouse, Toulon, Bordeaux, Versailles Saint-Quentin, Pau et Pays de l'Adour), une université japonaise (Tsukuba) et cinq EPIC ou entreprises (Ifremer, CEA, Andra, BRGM, EDF, CLS). Ce projet, qui bénéficie d'un financement dans le cadre de l'appel à projets « Recherche en sûreté nucléaire et en radioprotection » du programme d'investissements d'avenir, s'achèvera en 2022.



PAUL-OLIVIER REDON

Ingénieur Service Observatoire pérenne de l'environnement,
Direction de la Recherche et Développement

Exemple de l'étude des pratiques sylvicoles

Le fonctionnement biogéochimique de l'écosystème forestier est étudié depuis les débuts de l'OPE avec nos partenaires scientifiques mais les usages de ces milieux par l'homme n'ont été que peu renseignés sur le territoire de Meuse/Haute-Marne. En effet, le volet socio-économique n'a fait l'objet que de rares études alors que les pratiques sylvicoles, c'est-à-dire la façon dont sont exploitées les forêts, influencent fortement l'état et l'évolution des milieux forestiers. La connaissance de ces usages permet en outre d'évaluer quels sont les services écosystémiques les plus importants fournis par les forêts de la zone d'observation de l'OPE. Nous avons donc mandaté en 2020 le bureau d'études Wood'Up pour recueillir, sur la base d'analyses bibliographiques et d'enquêtes de terrain auprès des acteurs de la filière « Bois », des informations sur les modes de gestion des 100 km² de forêts de la zone de référence de l'OPE. Cette étude préliminaire a permis de mettre en évidence deux modes de fonctionnement des forêts bien distincts :

- d'une part, les forêts publiques où les peuplements sont bien suivis, gérés et exploités avec des objectifs de production de bois d'œuvre et d'attraits touristique, paysager et écologique ;

- d'autre part, les forêts privées très morcelées et considérées comme mal gérées, présentant souvent des peuplements de faible qualité destinés au bois d'industrie ou au bois de chauffage.

Ces premiers enseignements nécessitent d'être affinés par de nouvelles études pour évaluer précisément l'état des forêts et leurs usages, dans un contexte où, pour répondre à des objectifs à la fois de production, de biodiversité et de tourisme, les acteurs forestiers doivent faire face à de nombreux problèmes sanitaires et au changement climatique. Les enjeux sont pour l'Andra de disposer d'éléments de connaissance permettant, d'une part, de s'assurer de l'absence d'incidences significatives du centre de stockage Cigéo sur les forêts et, d'autre part, d'accompagner les acteurs de la filière du territoire d'implantation du projet.

associés doivent permettre d'objectiver le risque d'accumulation à long terme des radionucléides dans l'environnement naturel. La validation des prédictions sur de longues échelles de temps s'appuie sur une reproduction conforme du comportement de

marquages anciens (retombées des tests militaires atmosphériques, retombées de Tchernobyl et de Fukushima) pour diverses conditions environnementales.

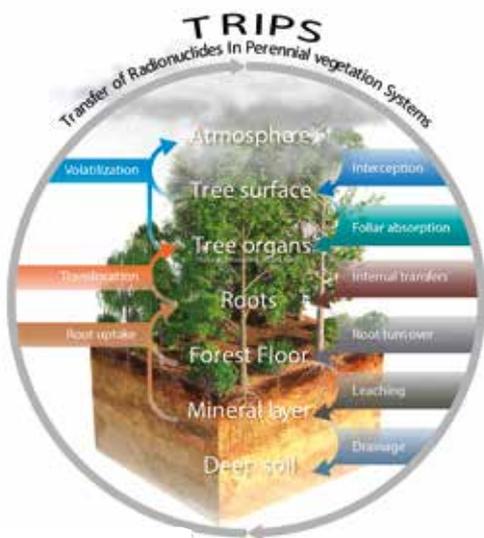


Schéma du cycle des radionucléides en écosystème forestier (modèle dynamique à compartiment TRIPS initialement développé dans le cadre du projet de recherche AMORAD)



Photographie de la tour à flux permettant l'enregistrement des paramètres atmosphériques au-dessus de la forêt de Montiers-sur-Saulx

02

Un appui continu à l'exploitation des centres de stockage de surface

Les centres de stockage de surface font régulièrement l'objet de réexamens de sûreté, intégrant le retour d'expérience de leur exploitation et leur fonctionnement, les progrès des connaissances, les optimisations réalisables, les études de faisabilité de prise en charge de nouveaux déchets et les évolutions des réglementations. Pour répondre à ces enjeux opérationnels, des études scientifiques et technologiques, dont les bases et les outils ont été acquis par les travaux de R&D, sont régulièrement mises en œuvre comme c'est le cas pour la simulation des écoulements dans la couverture du Centre de stockage de la Manche (CSM).



TÉMOIGNAGE
SANDRA JENNI

LA SIMULATION 3D DES ÉCOULEMENTS DANS LA COUVERTURE MULTICOUCHE DU CSM

La description de l'organisation précise des écoulements dans la couverture est une donnée importante pour accroître la maîtrise de son fonctionnement en exploitation et en après-fermeture et l'optimisation de son développement final (si besoin). Un modèle numérique des écoulements a donc été développé en 2020 avec pour objectifs d'améliorer la représentation du comportement hydraulique actuel en reproduisant au mieux les observations (calibration sur les mesures de drainage) et d'analyser le comportement de la couverture sous différentes hypothèses d'évolution de sa conception pour la fermeture définitive (adoucissement des pentes) ou de ses caractéristiques dans le temps (obturation des drains, altération de la géo-membrane).

Il a été nécessaire au préalable d'estimer les chroniques de la recharge (c'est-à-dire la fraction de la pluviométrie qui percole dans les matériaux poreux) car elle conditionne le drainage et les niveaux de saturation en eau des matériaux poreux constitutifs de la couverture. Les chroniques de recharge à l'échelle d'une couverture sont classiquement difficiles à évaluer car elles dépendent de plusieurs variables, difficiles à mesurer : le ruissellement de surface, l'évapotranspiration réelle et le terme de stockage/déstockage en eau des matériaux poreux. Plusieurs techniques d'évaluation ont été testées en 2020 : les méthodes de bilan, tel que le bilan Thornthwaite, ainsi que les modèles analogiques pluie-débit. Les résultats ont montré qu'aux pas de temps journaliers, les modèles pluie-débit fournissent des résultats plus fiables. Le modèle numérique des écoulements de la couverture a ensuite été mis en œuvre et a permis d'analyser finement l'évolution de la saturation des matériaux et le fonctionnement des drains. Les travaux d'ajustement se poursuivent pour consolider l'analyse des caractéristiques de l'écoulement et réaliser des analyses de sensibilité aux propriétés de la couverture.

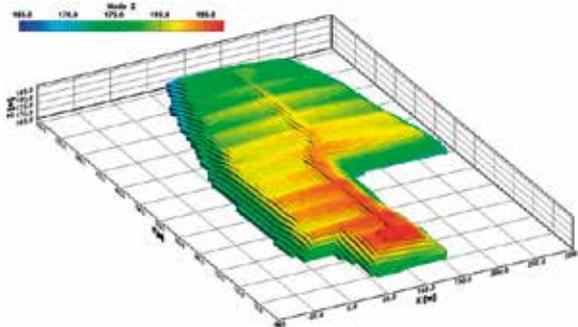


Illustration du maillage numérique de la couverture du CSM pour représenter finement les écoulements d'eau au sein de cette couverture



SANDRA JENNI

**Ingénieur analyse de performance,
Service Évaluation et Analyse de Performance,
Direction de la Recherche et Développement**

La construction du modèle numérique des écoulements d'eau dans la couverture du CSM nous a conduit à rassembler différents types de données (géométrie, mesures de drainage ainsi que propriétés hydrodynamiques des matériaux de la couverture) afin de bien caler une vision globale et cohérente de son fonctionnement hydraulique.

Nous avons également travaillé sur l'estimation des chroniques de recharge journalière qui, malgré les nombreuses mesures et observations, reste un paramètre toujours difficile à quantifier de manière précise. Il s'agit d'une donnée d'entrée majeure pour la modélisation, toute erreur sur la recharge se répercutant sur les résultats du modèle : saturation en eau des matériaux et débits de drainage.

Les analyses déjà réalisées ont montré que les modèles analogiques pluie-débit qui représentent les mécanismes d'infiltration dans le sol de manière simplifiée permettent une estimation très satisfaisante des chroniques de recharge. Nous devons tester d'autres méthodes afin de sélectionner celle qui est la plus adaptée à la couverture du CSM.

L'amélioration des chroniques de recharge permettra une exploitation plus détaillée des résultats du modèle numérique afin de déterminer le rôle des contrastes capillaires entre les matériaux ou d'investiguer l'influence des cheminements préférentiels dans les hétérogénéités observées dans la couche des schistes altérés.

Nous réalisons ainsi un travail de fond passionnant pour nos collègues de la Direction des opérations industrielles avec qui nous échangeons très régulièrement pour à la fois leur faire part des résultats de nos travaux de modélisation et coller au plus près de leur retour d'expérience du comportement de la couverture dont ils ont une connaissance détaillée.

03

Des solutions technologiques innovantes pour le traitement et le conditionnement de déchets radioactifs testées à l'échelle 1 dans le cadre de projets du programme d'investissements d'avenir (PIA)



Photographie de la présentation du projet Matrice lors de la journée consacrée aux projets innovants pour la gestion des déchets radioactifs de démantèlement



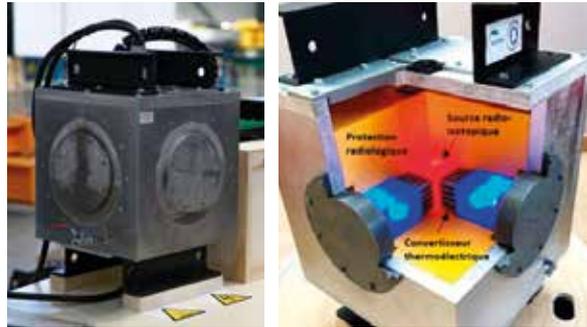
En 2014 et 2015, l'Andra et l'ANR organisaient un appel à projets dans le cadre du programme d'investissements d'avenir (PIA) afin de susciter l'innovation en réponse aux enjeux de gestion des déchets radioactifs de démantèlement. Une trentaine de projets, mobilisant largement les acteurs de la recherche et développement – laboratoires de recherche, PME et grands groupes au-delà du seul secteur nucléaire – sont ainsi soutenus⁴.

Malgré la Covid-19, les projets ont pu avancer. Toutefois, six mois de délai ont été accordés à l'ensemble des projets. Des délais supplémentaires, assortis d'un complément financier, ont également été accordés à sept projets (ComptonCAM - Nouvelle génération de caméra gamma, DEM'N'MELT - Vitrification in can *in situ* des déchets HA/MA-VL, H2MEMS - Capteur d'hydrogène basé sur des MEMS, INIFUGE - Géopolymère anti-feu, Kri-Terres, UCOMP - Matrice cimentaire anti-feu et SCELLMA - Procédé de scellement par plasma thermique pour les conteneurs HA en céramique). À fin 2020, six brevets supplémentaires ont été déposés (la liste des brevets publiés figure en Annexes).

Deux projets se sont achevés en 2020 : le projet MATRICE⁵ concernant le conditionnement en matrice cimentaire de déchets irradiants, et le projet RTG⁶, concernant la conception d'une source d'énergie à base d'Américium 241.



Procédé de conditionnement de déchets irradiants étudié dans le cadre du projet MATRICE : à gauche, photographie du test de vibrocompaction ; à droite : photographie du résultat obtenu à l'issue du test



Prototype de générateur thermoélectrique à radio-isotope développé dans le cadre du projet RTG : à gauche : photographie du prototype ; à droite : vue de l'intérieur du prototype

Le projet MATRICE a conduit au développement d'une formulation de matériau cimentaire spécifique pour les déchets hétérogènes et à la mise au point d'un procédé par vibrocompaction pour les déchets homogènes. Ces deux solutions ont été testées avec succès à l'échelle 1. Le projet RTG a conduit à la réalisation d'un prototype de RTG inactif (source d'²⁴¹Am simulée), actuellement exposé à l'Espace technologique du Centre de Meuse/Haute-Marne.

Concernant le projet PIVIC (procédé d'incinération-vitrification in can de déchets contaminés alpha de l'usine MELOX à Marcoule), les études de démonstration de la faisabilité industrielle se sont poursuivies, notamment au moyen d'essais d'incinération/vitrification réalisés sur le prototype échelle 1. Une revue des avancées du projet, menée dans le cadre du jalon Go/NoGo de faisabilité industrielle de 2021, a mis en évidence un bilan encourageant, tant sur le développement technologique que sur la préparation de la future installation. Néanmoins, plusieurs sujets techniques majeurs en vue de l'industrialisation du procédé nécessitent d'être résolus au préalable (foisonnement du bain de verre, présence de chlorure métallique performance de l'adjuvant, durabilité des CAN lors de la fusion/vitrification, cadence industrielle, durée de vie des électrodes).

⁴ Liste des projets accompagnés par l'Andra dans le cadre du programme « Nucléaire de Demain » du programme d'investissements d'avenir : <https://journee-pia-andra-anr.fr/projets/>

⁵ Projet PIA MATRICE (Matériaux résistants à l'irradiation à base de ciment), porté par l'entreprise Léon Grosse, le cimentier Vicat, le CEA et l'unité mixte de recherche CEA-CNRS Nimbe (Nanosciences et innovation pour les matériaux, la biomédecine et l'énergie) : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2019-03/Fiche%20projet%20MATRICE%20VF-FR.pdf>

⁶ Projet PIA RTG (Radio-isotopic Thermal Generator), porté par Orano, l'entreprise HotBlock OnBoard et l'unité mixte de recherche université de Lorraine-CNRS LEMTA (Laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée) : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2019-03/Fiche%20projet%20RTG%20VF-FR.pdf>

04

Une mobilisation soutenue et continue de la communauté scientifique nationale et internationale

Au regard des enjeux de ses missions, l'Andra a toujours mené ses travaux en s'appuyant sur la communauté scientifique, en particulier au travers de grands programmes nationaux ou de programmes européens comme Euratom, mais aussi sur les savoirs et les savoir-faire du tissu industriel, dans et hors de la filière nucléaire. L'année 2020 témoigne de cette constante, gage de rigueur, d'indépendance et d'excellence des données scientifiques et technologiques en support aux activités de l'Agence.



DES PARTENARIATS SCIENTIFIQUES MOBILISÉS POUR ÉCHANGER ET ANTICIPER LES ENJEUX DE R&D COMMUNS DE DEMAIN

UNE JOURNÉE ANDRA/UNIVERSITÉ DE LORRAINE DÉDIÉE AU MONITORING

Le renouvellement du partenariat avec l'université de Lorraine en 2019, avec qui l'Andra collabore depuis plus de 20 ans, a intégré des thématiques nouvelles comme la robotique, le traitement des données, l'ingénierie, la gestion des connaissances, l'environnement, etc. pour lesquelles l'université de Lorraine développe et propose de nombreux projets de recherche et d'innovation. Dans ce cadre, une journée thématique a été organisée le 24 novembre 2020 pour présenter, en lien avec l'état de l'art, les enjeux de R&D et d'Innovation concernant la conception des systèmes et des architectures de mesure et de surveillance adaptés au projet de centre de stockage Cigéo (capteurs, traitement des données, robotique, transmission des données ou, plus largement, chaîne de données).

Cette journée, organisée par visio-conférence compte tenu de la situation sanitaire, a mobilisé une quarantaine de représentants d'une quinzaine de laboratoires de l'université de Lorraine et a suscité de riches échanges. Plusieurs sujets d'intérêt commun ont d'ores et déjà été identifiés autour des micro-capteurs sans fil, du traitement de grande masse de données en temps réel et du traitement des incertitudes, de la gestion des données en environnement *Big data*, des sources d'énergie électrique autonomes et de l'utilisation de la spectroscopie Raman pour l'étude de la durabilité des bétons.

LA CRÉATION DE LA CHAIRE DE FORMATION « L'IA POUR APPLICATIONS ROBOTIQUES EN ENVIRONNEMENTS COMPLEXES » AVEC MINES-NANCY

L'Andra et Mines Nancy ont lancé en octobre 2020 une chaire de formation sur « l'intelligence artificielle pour les applications robotiques en environnements complexes ». La création de cette chaire est le fruit d'une collaboration de plus de trois ans entre l'École des mines Nancy et l'Andra et s'inscrit plus généralement dans l'accord de partenariat stratégique entre l'Andra et l'université de Lorraine, auquel contribue également le Loria par ses travaux de recherche en intelligence artificielle et en robotique.

Dans le cadre de cette chaire de formation, les étudiants de Mines Nancy mèneront des travaux de R&D sur l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) en robotique et le développement d'applications opérationnelles à destination d'acteurs académiques, scientifiques ou industriels. Une dizaine de projets sur le développement de l'IA, la conception de systèmes robotiques avancés et l'optimisation de l'acquisition et du traitement des données seront menés dans les cinq prochaines années, suivant trois axes :

- intelligents : capacité à s'adapter à une situation, notamment évolutive, et à appréhender leur environnement par les outils et techniques modernes de l'IA tels que la *machine learning* ou la *deep learning* ;
- modulaires : capacité à s'adapter en fonction de la mesure à réaliser, l'action à mener ou les calculs à réaliser pour accomplir cette action ;
- collaboratifs : capacité à s'échanger de l'information par des systèmes de communication robustes et ainsi de réaliser

Vérifier la capacité à retirer les colis : suivi mécanique par fibre optique de la déformation du chemisage

- Choix du câble et de la fibre : analyse de performance
- Etude métrologique de la fibre et de son interrogateur
- Faisabilité de la pose : protection/mise en place
- Faisabilité de la configuration
- Analyse des données de déformation et détermination de l'ovalisation en cours

Mesure de déformation orthoradiale sur une chemise

Mesure de température axiale sur une chemise

Sortie de fibres optiques au travers du joint de carrure

Suivi de la déformation orthoradiale

Exemple d'enjeu opérationnel décliné en spécificités techniques : le suivi de la déformation du chemisage des alvéoles de stockage de déchets HA, présenté lors de la journée thématique université de Lorraine/Andra sur le monitoring

des tâches sur le terrain nécessitant des interactions entre de multiples robots (potentiellement dotés de capacités différentes) mais également avec les humains au cœur du système.



Photographie du robot SCAR se déplaçant sans chuter sur les déblais devant le front de taille de la galerie GRD6 du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

Dans ce contexte, le Laboratoire souterrain de l'Andra offre un terrain d'expérimentations privilégié pour tester, entre autres, le robot Spot de la société Boston Dynamics, acquis par l'École des mines Nancy et renommé SCAR, ou encore des drones pour investiguer de « petits » espaces.

UN SÉMINAIRE À MI-PARCOURS DU PARTENARIAT ANDRA/IFPEN

TÉMOIGNAGE
OLGA
VIZIKA-KAVVADIAS



En décembre 2020, un séminaire rassemblant une trentaine de personnes sur une journée a permis dans une première partie de faire le bilan riche des projets en cours autour des thématiques de la corrosion, du monitoring, instrumentation et analyse et de la simulation numérique. Dans une deuxième partie, des ateliers ont été organisés pour partager les enjeux R&D de chaque organisme et identifier les besoins communs à développer dans le futur sur trois sujets : endommagement/fissuration des matériaux et des milieux naturels, IA/digitalisation, environnement/climat et géomorphologie. Par ailleurs, un séminaire dédié à la géologie s'est aussi tenu.



OLGA VIZIKA-KAVVADIAS

Directrice scientifique de l'IFP Énergies nouvelles (IFPEN)

IFP Énergies nouvelles (IFPEN) est un acteur majeur de la recherche et de la formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement. Avec ses quatre orientations stratégiques – climat, environnement et économie circulaire – énergies renouvelables – mobilité durable – hydrocarbures responsables – il est fortement engagé dans la transition énergétique, mais également dans la transition écologique.

Au cœur de son action, l'innovation s'appuie sur un socle de recherche fondamentale qui décline les enjeux liés à la recherche appliquée en questions scientifiques ouvertes. Pour répondre à ces questions de manière cohérente, la recherche fondamentale se structure autour de neuf verrous scientifiques. Sa mission consiste à acquérir et maintenir des connaissances et des compétences de haut niveau au sein d'IFPEN ainsi qu'au travers de partenariats scientifiques structurants avec le monde extérieur.

Le partenariat Andra et IFPEN répond pleinement à cet objectif. Partenaires depuis plus de 20 ans, Andra et IFPEN ont joint leurs forces en mai 2018 par un accord-cadre de collaboration, pour progresser ensemble sur les quatre thématiques de recherche identifiées conjointement :

- corrosion ;
- monitoring, Instrumentation et analyse ;
- simulations numériques ;
- modélisations géologiques.

Bien que motivés par des contextes applicatifs très différents, tous ces sujets posent les mêmes questions scientifiques fondamentales et font appel au même type de compétences.

Malgré une année 2020 marquée par les contraintes imposées par la crise sanitaire, les travaux, aussi bien de réalisation de projets que d'animation scientifique et d'instruction prospective, se sont poursuivis et ont donné des résultats très satisfaisants. De nouveaux projets ont été lancés portant sur les mesures de perméabilité/péthro-acoustiques, et sur la simulation performante du transport réactif.

Deux séminaires ont été organisés en 2020. Le premier sur la modélisation géologique, le second sur la préparation de trois sujets prospectifs : l'endommagement et la fissuration des matériaux et des milieux naturels ; l'IA et la digitalisation ; l'environnement, le climat et la géomorphologie. Les sujets abordés lors de ces deux séminaires seront approfondis en 2021 et d'éventuels nouveaux projets collaboratifs seront instruits et montés.

L'année 2021 sera d'autant plus importante qu'elle est la dernière année pleine de l'accord-cadre. Les différentes actions contribueront ainsi au travail à mener pour le renouvellement de l'accord-cadre. Les échanges très constructifs à tous les niveaux, la qualité des résultats obtenus et l'animation exemplaire de la collaboration témoignent de la dynamique mise en œuvre et d'une réelle volonté d'avancer ensemble sur les axes identifiés. Le bilan très positif de cette première période permet d'envisager avec optimisme la suite de la collaboration, qui, par la complémentarité de ses acteurs, peut adresser des enjeux majeurs, à la fois scientifiques, industriels et sociétaux.

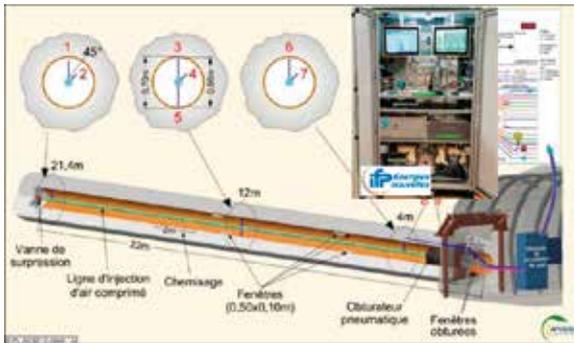


Illustration des projets en cours dans le cadre du partenariat scientifique Andra/IPFEN : vue schématique d'un démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA au Laboratoire souterrain de l'Andra sur lequel a été installé un dispositif IPFEN de mesures multi-gaz connecté

L'ANDRA ÉLUE REPRÉSENTANTE DES MEMBRES ASSOCIÉS AU CONSEIL D'ALLENVI



En 2020, l'Andra a été élue, avec l'Ineris, représentante des membres associés au conseil d'AllEnvi, l'alliance nationale qui vise à fédérer les recherches françaises autour de l'environnement. Au-delà de la confiance accordée à l'Andra par les membres associés, l'élection de l'Agence souligne la place de l'environnement dans ses missions, son interaction avec le monde de la recherche, notamment en environnement, et son expertise à associer les dimensions industrielles, de gestion de grands projets et environnementales. En effet, pour répondre à sa mission de protéger l'homme et l'environnement du danger que représentent les déchets radioactifs, l'Andra conduit, depuis 1991, de nombreuses recherches et études dans le domaine de l'environnement, et poursuit dans le cadre de ses projets de stockage et de l'exploitation des stockages existants la mise en œuvre d'une approche environnementale globale, toujours plus intégrée et soucieuse du respect de l'environnement, comme en témoigne l'étude d'impact du dossier de demande de DUP du projet de centre de stockage Cigéo déposée en 2020.

UNE SYNERGIE ACCRUE ENTRE LES ACTEURS EUROPÉENS DE LA RECHERCHE SUR LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DES DÉCHETS RADIOACTIFS

TÉMOIGNAGE
LOUISE THÉODON



UN BILAN POSITIF DE LA PREMIÈRE ANNÉE D'EURAD (EUROPEAN JOINT PROGRAMME ON RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT) QUI FÉDÈRE DÉSORMAIS TOUTE LA RECHERCHE EUROPÉENNE SUR LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE PROFOND



La première année du programme EURAD⁷, lancé en juin 2019 et coordonné par l'Andra, a été marquée par la finalisation de la feuille de route. Découpé en sept grands thèmes, ce document fondateur est une représentation d'un programme générique de gestion des déchets radioactifs. À terme, il doit permettre aux utilisateurs et aux programmes d'accéder, par simple clic, aux connaissances existantes et aux travaux en cours et futurs dans le cadre d'EURAD et au-delà.

La feuille de route est axée sur les connaissances et les compétences (y compris les infrastructures) considérées comme les plus importantes pour la mise en œuvre d'un programme de gestion des déchets radioactifs. Elle précise, pour chacune des étapes clés, comment les différents aspects de conception des installations de stockage et d'élaboration des dossiers de sécurité (et les analyses de sécurité correspondantes) s'étendent sur toutes les phases. Elle permet également de fournir un cadre afin d'examiner si les informations et connaissances sont suffisantes ou si des activités de RD&D supplémentaires sont nécessaires.

Le lancement d'une seconde vague de projets moins d'un an après le lancement du programme a également eu lieu en 2020. Ce processus porté par le Bureau d'EURAD (composé de représentants des trois collègues : agences/implémenteurs, évaluateurs/régulateurs et organismes de recherche, sous la responsabilité de l'Assemblée

⁷ Pour plus d'informations sur EURAD : <https://www.ejp-eurad.eu/>



LOUISE THÉODON

Ingénieure projets de recherche et innovation européens et nationaux, Direction de la Recherche et Développement

Outre les défis liés au lancement d'un programme européen comme EURAD, unique par sa taille (104 partenaires) et premier en son genre dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs, cette première année effective a été riche en événements. La volonté d'avoir un programme ouvert, dynamique et axé sur les besoins, passant notamment par l'implémentation d'une nouvelle vague de projets, moins

d'un an après le lancement, en est l'une des illustrations. Le succès de cette seconde vague et l'émergence de projets de qualité sont le fruit d'une implication forte de chacun des Collèges constitutifs de EURAD (implémenteurs WMO, évaluateurs techniques TSO, et chercheurs RE) et d'une gouvernance bien définie, qui a permis à chacun de ces acteurs d'exercer son rôle dans un cadre collectif.



Illustration de la Roadmap de l'European Joint Programme on radioactive waste management EURAD

TÉMOIGNAGE
VALÉRY
DETILLEUX



générale) a permis d'établir une liste de nouveaux projets pouvant être financés dans le cadre d'EURAD. Une première étude a permis de regrouper certaines propositions similaires afin d'aboutir à une liste restreinte et de sélectionner les cinq projets pouvant entrer en phase de développement : trois projets de recherche et développement (*ConCorD - Container Corrosion under Disposal conditions*, *MAGIC - Chemo-Mechanical Aging of Cementitious Materials*, *MODATS - Monitoring Equipment and Data Treatment for Safe Repository Operation and Staged Closure*) et deux extensions d'études stratégiques (*ROUTES - Waste management routes in Europe from cradle to grave*, *UMAN - Uncertainty Management multi-actor network*). Ce processus a notamment permis d'ouvrir la participation à de nouveaux partenaires, jusqu'à présent non impliqués dans EURAD. L'Andra est engagée dans chacun des nouveaux projets déposés qui devraient débiter le 1^{er} juin 2021.

UN ENGAGEMENT POURSUIVI SUR DES PROJETS EUROPÉENS ANTÉRIEURS À EURAD

THERAMIN : le traitement thermique de déchets radioactifs

Débuté en 2017, le projet européen THERAMIN⁸ (*Thermal treatment for radioactive waste minimization and hazard reduction*), portant sur les procédés de traitement thermique des déchets radioactifs de moyenne et de faible activité, s'est achevé en 2020. Il visait à (i) identifier les déchets pouvant bénéficier d'un traitement thermique (WP2), (ii) réaliser des essais de traitement thermique en s'appuyant sur les technologies développées dans les pays participant à ce projet (WP3) et (iii) évaluer l'impact du traitement thermique sur le stockage des résidus de traitement (WP4).

⁸ Pour plus d'informations sur le projet européen THERAMIN : <http://www.theramin-h2020.eu/>



VALÉRY DETILLEUX

Chairman du Bureau d'EURAD, Branch Manager, Bel V

La communauté du projet EURAD coordonné par l'Andra rassemble, au sein de ses trois collègues (WMO, TSO, RE), les principaux acteurs européens de la gestion à long terme des déchets radioactifs autour d'un même programme d'activités de R&D, d'études stratégiques et de partage de connaissances. Le Bureau d'EURAD représente les intérêts des trois collègues et coordonne les développements stratégiques du projet.

L'année 2020 a été notamment marquée par le développement d'une deuxième vague d'activités d'EURAD, devant être implémentée à partir de 2021. Cet exercice a représenté un défi important pour le Bureau et les Collèges d'EURAD qui ont dû

s'accorder sur de nouvelles activités originales et innovantes, s'inscrivant dans la vision et le budget d'EURAD et répondant aux besoins conjoints des collègues. Les trois nouvelles activités de R&D et deux extensions d'études stratégiques qui ont été identifiées et développées dans ce cadre réaffirment la volonté des Collèges d'EURAD à œuvrer ensemble, dans le respect de l'indépendance de leurs missions, au futur d'EURAD. Ce succès donne confiance en la capacité d'EURAD à relever ses prochains défis importants, tels que la mise en œuvre de son programme de gestion de la connaissance (dont la Roadmap initiée en 2020 constitue déjà une avancée majeure) et la mise à jour de son agenda conjoint d'activités *Strategic Research Agenda*.

Technologie	Boues	Déchets cimentés	REI organiques	REI inorganiques	Cendres	Liquides inorganiques	Déchets solides mixtes	Uranium
GeoMelt®	WP3 WP4	WP3 WP4		WP4				
HIP (Hot Isostatic Pressing)	WP3 WP4			WP3 WP4				WP4
SHIVA			WP3 WP4					
In-Can Melter					WP3 WP4			
VICHR Vitrification						WP3 WP4		
Gazéification			WP3 WP4					
Vitrification Plasma		WP4	WP4				WP4	
Incinération					WP4		WP4	

Combinaisons de déchets/traitements thermiques étudiées dans le cadre du projet européen THERAMIN

Le projet a regroupé un consortium de douze partenaires européens, experts du traitement thermique des déchets radioactifs, producteurs de déchets et organismes en charge de la gestion des déchets radioactifs afin de fournir une vue de l'utilisateur final : Andra (France), ORANO (France), CEA (France), GSL (Royaume-Uni), FZJ (Allemagne), LEI (Lituanie), NNL (Royaume-Uni), ONDRAF (Belgique), SCK-CEN (Belgique), USFD (Royaume-Uni), VTT (Finlande) et VUJE (Slovaquie).

Le projet THERAMIN a permis de créer un réseau d'experts du traitement thermique et de faire le lien avec les producteurs et les gestionnaires de déchets radioactifs pour une mise en perspective des problématiques rencontrées ainsi que des solutions existantes et en développement à l'échelle européenne. Les travaux menés ont permis d'initier une démarche d'évaluation et d'inter-comparaison des méthodes de traitement, s'appuyant sur une approche « cycle de vie » et intégrant des thématiques nécessaires à cette évaluation, à savoir la sûreté opérationnelle, l'impact environnemental, la maturité technologique, les besoins en termes de planning, l'impact sur le stockage et la sûreté après-fermeture, ainsi que l'impact stratégique d'un tel traitement.

La démarche initiée doit être consolidée, à la fois sur l'optimisation des déchets issus du traitement thermique, la définition de critères d'acceptation pour ces derniers et la compréhension de leur comportement long terme. Déjà, pour les déchets organiques (liquides et solides), les déchets métalliques ainsi que les déchets cimentés, les travaux initiés dans THERAMIN se poursuivent au sein du nouveau projet Européen PREDIS⁹ (*Pre-disposal management of radioactive waste*), lancé en parallèle d'EURAD et suivant une logique similaire.

CHANCE : les dispositifs de contrôle non destructifs de déchets radioactifs conditionnés

Lancé en 2017, le projet CHANCE¹⁰, coordonné par l'Andra, regroupe douze partenaires autour d'un objectif commun de caractérisation des déchets radioactifs conditionnés à l'aide de méthodes d'analyse non destructives : Andra (France), CEA (France), ENEA (Italie), Jülich (Allemagne), Setsafe-KEP Technologies (France), SCK CEN (Belgique), université de Sheffield (Royaume-Uni), université de Bristol (Royaume-Uni), VTT (Finlande), Raten (Roumanie), WUT (Pologne), INCT (Pologne). Trois techniques sont développées dans le cadre de ce projet : la calorimétrie pour réduire les incertitudes associées au spectre radiologique des déchets ; la tomographie muonique pour la caractérisation de la composition des colis des déchets et la spectroscopie à cavité optique pour la détection de gaz radioactifs (¹⁴C et ³⁶Cl).



Photographie des équipements de tomographie muonique développés dans le cadre du projet européen CHANCE

⁹ Pour plus d'informations sur le projet européen PREDIS : <https://predis-h2020.eu/>

¹⁰ Pour plus d'informations sur le projet européen CHANCE : <https://www.chance-h2020.eu/>



Photographie des équipements développés dans le cadre du projet européen CHANCE : mise en place d'un fût dans le calorimètre

En raison de la crise sanitaire, les activités de 2020 associées aux essais en laboratoire avec des équipements à grande échelle ont pris du retard et une demande d'extension du projet de six mois jusqu'à novembre 2021 a été accordée. La troisième assemblée générale du projet, qui s'est tenue en 2020 par téléconférence, a toutefois souligné des avancées techniques.

Malgré les difficultés rencontrées sur le plan expérimental, des progrès importants ont été faits au niveau des simulations numériques, notamment en lien avec la détection des radionucléides par différentes techniques, dont la calorimétrie, et des modélisations associées à la discrimination par tomographie aux muons des différents éléments dans un colis de déchets. Ces outils numériques pourront être mis en œuvre sur les dispositifs expérimentaux développés lorsque ceux-ci seront opérationnels.

DISCO : les mécanismes de dissolution du combustible utilisé en situation de stockage

Le projet européen DISCO¹¹ (2017 – 2021), dédié à la dissolution du combustible usé et aux processus chimiques associés au sein du conteneur de stockage, a pour objectif d'acquies des données complémentaires sur la dissolution des combustibles en mettant l'accent sur les combustibles UO_2 dopés avec Cr/Al et les combustibles Mox. L'Andra, qui se positionne en utilisateur final, participe au projet avec d'autres agences (RWM – Royaume-Uni, Ondraf - Belgique, Nagra - Suisse, Enresa - Espagne, Posiva - Finlande, SKB - Suède) et des évaluateurs techniques (FANC - Belgique, BfE - Allemagne, SSM - Suède, ENSI - Suisse, CSN - Espagne).

Le CEA et l'École des mines de Paris sont associés à ce projet avec une approche double « expérimentation + modélisation » d'un matériau modèle homogène $(U_{0,73}Pu_{0,27})O_2$ altéré dans de l'eau du Callovo-Oxfordien en présence d'une lame de fer. Ce matériau modèle permet de simuler les amas enrichis en plutonium présents dans le combustible Mox et de préciser leur comportement lors de l'altération du combustible. Ces travaux contribuent à une démarche plus globale mise en œuvre par l'Andra, le CEA et EDF depuis quelques années afin d'étudier l'influence des différentes conditions environnementales potentiellement rencontrées dans un stockage géologique profond sur la lixiviation de la matrice des combustibles Uox et Mox. Ils ont notamment fait l'objet des travaux de thèse de Valentin Kerleguer, soutenus en septembre 2020. Les résultats actuellement disponibles pour le combustible Mox mettent en évidence que :

- la vitesse de dissolution du combustible Mox est plus faible dans de l'eau du Callovo-Oxfordien qu'en eau carbonatée, effet probablement induit par la présence de Ca et Si en solution ;

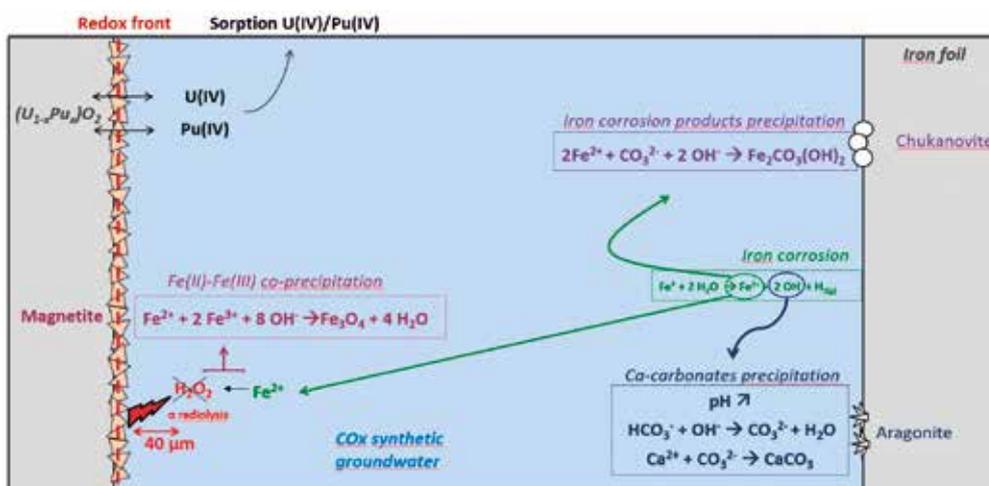


Schéma des mécanismes couplés de dissolution d'un matériau modèle $(U, Pu)O_2$ dans de l'eau du Callovo-Oxfordien, à température ambiante et en présence d'une lame de fer pré-corrodée
(source : Valentin Kerleguer. Apport de l'étude de matériaux modèles $U_1-xPu_xO_2$ à la compréhension des mécanismes d'altération des combustibles UO_x et MO_x en stockage géologique. Ingénierie de l'environnement. Université Paris sciences et lettres, 2020)

¹¹ Pour plus d'informations sur le projet européen DISCO : <https://www.disco-h2020.eu/>

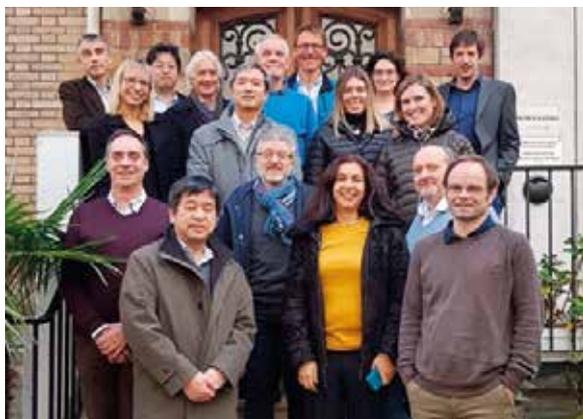
- la vitesse de dissolution est réduite davantage voire inhibée en présence de fer suite à la consommation de H_2O_2 par les ions Fe^{2+} produits par la corrosion anoxique du fer. Ce processus est accompagné de la précipitation de magnétite sur les pastilles ;
- les amas enrichis en Pu du combustible Mox, simulé par le matériau modèle homogène $U_{0.73}Pu_{0.27}O_2$ ont une incidence sur l'altération de la matrice avec un effet stabilisateur vis-à-vis de la dissolution oxydante : cet effet nettement visible en eau carbonatée est moins marqué dans de l'eau du Callovo-Oxfordien. La modélisation de l'altération du combustible Mox implique de comprendre cet effet spécifique du plutonium et de distinguer à terme la dissolution des amas de Pu des autres phases du combustible Mox qui se rapproche d'une phase de type UO_2 .

DES MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES MAINTENUES

L'ORGANISATION PAR L'ANDRA DU 8^e WORKSHOP INTERNATIONAL TRU-WASTE

La 8^e édition du *TRU-Waste Workshop*, organisée par l'Andra, s'est déroulée du 3 au 5 février 2020 au siège de la Société Géologique de France à Paris. Lieu d'échanges d'informations, ce workshop, initié en 1996 et organisé tous les trois ans environ, réunit des agences de gestion des déchets radioactifs et des organismes de recherche européens et japonais (Andra - France, CEA - France, SCK-CEN - Belgique, ONDRAF/NIRAS - Belgique, SKB - Suède, RWMC - Japon, JAEA - Japon, FANC - Belgique, PSI - Suisse, RWM - Royaume-Uni) autour des *TRU-Waste* (acronyme anglais pour désigner des déchets radioactifs contenant de nombreux éléments transuraniens, Pu, Am, etc.). En France, ils correspondent à certaines familles de déchets MA-VL contenant des composés organiques, des sels solubles, des matrices bitumeuses ou des métaux.

Les discussions de cette édition 2020 ont principalement porté sur (i) le comportement des déchets MA-VL en conditions de stockage (dégradation des déchets, radiolyse, corrosion et relâchement du ^{14}C , gonflement des enrobés bitumineux), (ii) la mobilité des



Photographie des participants au 8^e workshop TRU-Waste organisé par l'Andra en 2020

radionucléides sous l'effet d'une perturbation saline ou par des molécules organiques, (iii) l'influence de l'activité microbienne sur les conditions redox et le devenir des composés issus des déchets, (iv) la migration de gaz en contexte de stockage géologique profond, et (v) des cas d'étude relatifs à différents projets de stockage géologique. Les échanges ont permis de dresser un état des lieux sur la connaissance actuelle et sur les enjeux à venir pour les déchets TRU.

LE LANCEMENT D'UNE NOUVELLE PHASE DE L'EXERCICE INTERNATIONAL DE MODÉLISATION DES PROCESSUS COUPLÉS, DECOVALEX-2023, SOUS L'IMPULSION DE L'ANDRA

Le projet DECOVALEX¹² est un exercice international initié en 1992, dans le but de faire progresser la compréhension et la modélisation des processus couplés thermo-hydro-mécanique-chimique (THMC) dans les systèmes géologiques dans le cadre du stockage de déchets radioactifs. Chaque phase du projet, d'une durée de quatre ans, réunit ainsi des agences de gestion des déchets radioactifs et des autorités réglementaires qui soutiennent la thématique de recherche mise en avant et financent individuellement les équipes de recherche des partenaires et prestataires qu'ils mobilisent sur le projet. L'exercice DECOVALEX-2023 (2020-2023) implique 17 organisations et environ 50 équipes de recherche, autour de sept tâches de modélisation.

Dans le cadre de la phase précédente DECOVALEX-2019 (2016-2019), sept exercices (*Benchmarks*) différents ont été menés, dont l'exercice « *upscaling of THM modelling from small size experiment (some cubic meter) to the real scale of a waste repository* » proposé et piloté par l'Andra. Quatre équipes de recherche ont participé à cet exercice : LBNL (États-Unis), NWMO (Canada), Quintessa (Royaume-Uni) et UFZ/BGR (Allemagne), en utilisant des codes de calcul THM différents (Aster, Comsol, Flac3D, Flac3D/Though, OpenGeoSys). L'Andra a utilisé l'approche thermo-poro-élastique mise en œuvre dans les calculs de dimensionnement thermique pour Cigéo, approche également choisie *in fine* par les autres équipes pour réaliser l'ensemble des calculs.

L'analyse globale des inter-comparaisons menée en 2019 a montré que les approches basées sur la thermo-poro-élasticité reproduisaient correctement la réponse thermo-hydro-mécanique en champ lointain de l'expérimentation TED menée au Laboratoire souterrain de Meuse/ Haute-Marne, en prenant en compte l'anisotropie du comportement. À l'échelle de l'alvéole, les prédictions ont conclu, d'une part, à une très bonne reproduction des champs de température ; et, d'autre part, à la nécessité de mieux prendre en compte la zone fracturée autour de l'alvéole pour mieux reproduire les pressions interstitielles en champ proche de l'alvéole. Enfin, à l'échelle d'un quartier de stockage, des recommandations relatives à deux aspects ont été faites pour la réalisation des calculs grande échelle : la simplification géométrique du problème et la prise en compte de la variabilité spatiale des paramètres THM du Callovo-Oxfordien. Ces résultats

¹² Pour plus d'informations sur l'exercice international DECOVALEX : <https://decovaler.org/index.html>

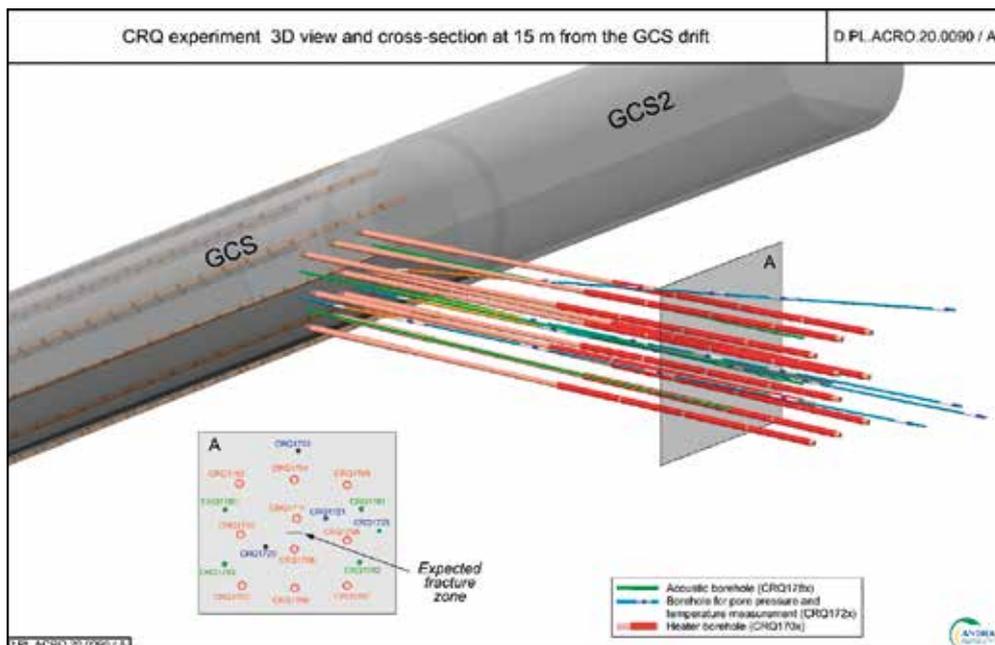


Schéma de l'expérimentation CRQ (Comportement thermo-hydro-mécanique représentatif du Callovo-Oxfordien autour d'un quartier HA) réalisée in situ au Laboratoire souterrain : visualisation du positionnement des sondes chauffantes, des capteurs de mesure et de la zone où la fracturation sous sollicitation thermique est attendue

ont donné lieu à la publication d'une dizaine d'articles dans des revues internationales par les différentes équipes impliquées sur cet exercice de DECOVALEX-2019.

Fort de ce retour d'expérience très positif, l'Andra a proposé un nouvel exercice autour de la modélisation de la fracturation des formations argileuses profondes sous l'effet de la température ou du gaz « HGfrac » (*Heating and Gas fracturing*) pour la nouvelle phase DECOVALEX-2023 (2020-2023). L'objectif principal est d'investiguer la capacité des modèles et codes de calcul à simuler les conditions d'une fracturation d'une formation argileuse profonde sous l'effet d'une sollicitation thermique ou au gaz. Pour cet exercice, qui réunit Andra (France), BGR/UFZ/GRS (Allemagne), Enresa (Espagne), DOE (États-Unis) et leurs partenaires de recherche UPC (Espagne), Ineris (France), Lamcube (France), Quintessa Ltd (Royaume-Uni), université d'Edimbourg (Royaume-Uni) et LBNL (États-Unis), l'accent est mis notamment sur l'évaluation du niveau de contraintes effectives au moment de la fracturation en traitant les deux processus « thermique » et « gaz » de manière parallèle et *a priori* indépendante. Conformément à l'esprit de DECOVALEX, le déroulement de cet exercice suit une approche de complexité croissante : modélisation à l'échelle de l'échantillon, puis modélisation interprétative d'un essai *in situ* suivie d'une modélisation prédictive (expérimentation thermique CRQ et expérimentation au gaz PGZ, menées au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne) et enfin une modélisation à l'échelle d'un stockage.

LA RÉUNION DES ACTEURS INTERNATIONAUX DE LA GESTION DES DÉCHETS NUCLÉAIRES À WASTE MANAGEMENT 2020

TÉMOIGNAGE
JACQUES DELAY



Le plus grand événement annuel concernant la gestion des déchets nucléaires, la conférence Waste Management¹³, s'est tenu à Phoenix du 8 au 12 mars 2020. Cet événement a rassemblé plus de 2000 participants et 200 industriels qui ont présenté les stratégies et les techniques mises en œuvre pour le démantèlement, l'assainissement des sites, et le traitement et la gestion des déchets nucléaires. Cette conférence a été fortement marquée par la participation des acteurs institutionnels (DOE) et des industriels de l'Amérique du Nord, tendance particulièrement accentuée en 2020 en raison de l'absence de certains pays comme les pays asiatiques et européens, due à la crise sanitaire et aux mesures de confinement appliquées. Malgré l'annulation d'une centaine d'interventions, les États-Unis d'Amérique ayant commencé à prendre les premières mesures de restriction de circulation juste à la fin de la conférence, cette dernière s'est déroulée conformément au programme.

On retiendra tout particulièrement la présentation des retours d'expérience sur les sites historiques d'Amérique du Nord liés à des

¹³ Pour plus d'informations sur la conférence Waste Management : <https://www.wmsym.org/>

activités minières ou de recherches militaires arrivant en fin de cycle de décontamination, leur dépollution et la gestion de leurs déchets après plusieurs décennies de travaux ont fait l'objet de plusieurs présentations, dont il est possible de tirer profit. Un aspect sensible a été, dans plusieurs cas, la gestion environnementale de ces sites occupés par des tribus indiennes qui se sont imposées comme des acteurs clés de la réussite de ces opérations.

UN WORKSHOP DU CLAYCLUB DE L'AEN ORGANISÉ PAR L'ANDRA POUR TIRER UN PREMIER BILAN DES TRAVAUX DU PROJET CLAYWAT SUR LA STRUCTURATION DE L'EAU INTERSTITIELLE DES ROCHES ARGILEUSES

Créé en 1990, le ClayClub¹⁴ est un groupe de travail international de l'AEN regroupant des acteurs internationaux (organismes de gestion des déchets radioactifs et organismes de recherche) autour de la caractérisation, la compréhension et la représentation des roches argileuses envisagées comme formations hôtes des stockages géologiques de déchets radioactifs. L'objectif est l'établissement en commun de bases de connaissances et de méthodologies de caractérisation et de représentation des roches argileuses étudiées de par le monde.

Cela concerne en particulier la structuration de l'eau interstitielle des roches argileuses qui est un paramètre des comportements hydraulique, mécanique et géochimique de ces roches. Le ClayClub a ainsi initié en 2016 un projet inédit pour une durée de cinq ans, le projet ClayWat, qui a pour objectif de mieux quantifier la structuration et les caractéristiques de l'eau aux différentes échelles dans les roches argileuses au travers d'un ensemble de méthodes, conventionnelles comme innovantes, et d'en comparer les résultats.

L'Andra a organisé un Workshop en 2020, par visioconférence, afin de tirer les premiers enseignements de ClayWat, notamment à partir de l'analyse d'un ensemble de mesures réalisées pour les différentes roches argileuses (France, Suisse, Japon et Canada). Le workshop a souligné les avancées scientifiques réalisées ces dix dernières années pour étudier le comportement de l'eau au sein de roches constituées de pores de taille nanométrique. Des méthodes innovantes basées sur la technique de résonance magnétique nucléaire permettent ainsi aujourd'hui d'accéder à des paramètres décrivant les quantités et mobilités respectives des différents types d'eau (libre, liée, interfoliaire). L'obtention de telles données offre des perspectives nouvelles pour poursuivre l'amélioration des modèles hydromécaniques et de transport dans les roches argileuses.

UNE RÉUNION TECHNIQUE DU GROUPE DE TRAVAIL DE L'AIEA, PILOTÉ PAR L'ANDRA, SUR LA SURVEILLANCE DES STOCKAGES GÉOLOGIQUES POUR ÉLABORER UN GUIDE DE BONNES PRATIQUES

L'AIEA a mis en place depuis 2017 un groupe de travail sur la mise en œuvre et l'application des programmes de surveillance dans le cadre



JACQUES DELAY

Chargé de mission, Direction de la Recherche et Développement

Waste Management 2020 a été pour l'Andra l'occasion de présenter au travers de neuf interventions l'avancement du projet de centre de stockage Cigéo et, plus particulièrement, le programme scientifique et d'essais technologiques. Elle m'a permis de présenter un panorama retraçant plus de 20 ans d'activités sur le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Parmi les très nombreuses sessions disponibles, j'ai porté mon choix sur celles consacrées aux opérations de décontamination et de dépollution des sites historiques d'Amérique du nord (en particulier Savannah River aux États-Unis et Port Hope au Canada). Les ingénieurs et responsables de ces opérations ont présenté les incontestables succès de ces dernières, mais aussi leurs difficultés de mise en œuvre. Ils ont montré comment ils ont pu et su adapter des objectifs ambitieux sur les plans techniques, humains et financiers, en opération successives et ciblées permettant de rétablir des situations acceptées par les administrations et les populations locales. Dans de nombreuses situations, le temps et les relations suivies avec les parties prenantes ont permis de surmonter les oppositions et les peurs qui s'expriment naturellement quand on traite de ces sujets.

Même si le contexte technique et culturel de ces opérations est très différent de celui du projet de centre de stockage Cigéo en Meuse/Haute-Marne, le pragmatisme de ces ingénieurs ainsi que l'approche constructive des parties prenantes peut être une source d'inspiration.

du développement des stockages géologiques de déchets radioactifs (*the Use of Monitoring Programmes in the Safe Development of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste*). L'objectif est de réunir des pays ayant des problématiques communes sur la surveillance des stockages de déchets radioactifs afin de partager les enjeux, les questionnements et les pratiques. Piloté par l'Andra, ce groupe réunit des participants d'une quinzaine de pays (Suède, Finlande, Allemagne, Canada, États-Unis, Russie, Tchéquie, etc.) à différentes étapes d'avancement dans leurs projets de stockages géologiques profonds ou de surface.

La 3^e réunion technique de ce groupe de travail a eu lieu début 2020 à l'AIEA à Vienne et a permis de travailler sur la réalisation d'un document technique (publication AIEA) présentant les objectifs de surveillance vis-à-vis de la sûreté après-fermeture en lien avec les différentes étapes de développement d'un stockage. L'intérêt des différents participants et la richesse des échanges montrent la volonté des pays engagés dans ce groupe de partager à l'échelle internationale sur les pratiques de surveillance et de s'appuyer sur des recommandations proposées par l'AIEA.

¹⁴ Pour plus d'informations sur le ClayClub de l'AEN : https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_29314/working-group-on-the-characterisation-the-understanding-and-the-performance-of-argillaceous-rocks-as-repository-host-formations-clay-club

05

Le maintien du niveau d'excellence élevé des activités scientifiques et technologiques de l'Andra par une évaluation externe continue

Les activités scientifiques de l'Andra sont évaluées régulièrement par des instances nationales telles que la Commission nationale d'évaluation (CNE2), l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et le Conseil scientifique de l'Agence. L'Andra s'appuie également, sur le plan opérationnel, sur des comités scientifiques spécialisés : le Comité d'orientation et de suivi du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (COS) et le Comité d'orientation et de suivi de l'Observatoire pérenne de l'environnement (COS-OPE). Le Conseil scientifique et ces comités scientifiques spécialisés ont un rôle consultatif et témoignent de la volonté de l'Andra de disposer d'avis extérieurs indépendants pour accompagner la définition et la mise en œuvre de sa démarche d'excellence scientifique. L'année 2020 a été marquée par le renouvellement du Conseil scientifique, mais également de ces deux comités d'orientation et de suivi.



LE RENOUVELLEMENT D'INSTANCES CONSULTATIVES ET LEUR ÉLARGISSEMENT À DE NOUVEAUX DOMAINES SCIENTIFIQUES

TÉMOIGNAGE
PIERRE TOULHOAT



UN NOUVEAU PRÉSIDENT ET DE NOUVEAUX MEMBRES POUR LE CONSEIL SCIENTIFIQUE DE L'ANDRA DONT LES ACTIVITÉS S'INSCRIVENT DANS UNE PÉRIODE IMPORTANTE DE L'AGENCE

Créé par le décret ministériel du 30 décembre 1992 relatif à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, le Conseil scientifique de l'Andra est composé de 12 membres au plus, nommés pour cinq ans. Le Haut-Commissaire à l'Énergie atomique en est membre de droit. Le Conseil scientifique de l'Andra émet des avis sur la stratégie de recherche et développement, les programmes de recherche et les résultats scientifiques présentés par l'Agence.

En 2020, le Conseil scientifique a vu Pierre Toulhoat succéder à Christian Fouillac à sa présidence et a accueilli deux nouveaux membres¹⁵ couvrant deux disciplines importantes, les géosciences (Stéphane Guillot, directeur adjoint scientifique en charge du domaine Terre Solide - Institut national des sciences de l'Univers du CNRS) et la métrologie (Maguelonne Chambon, directrice de la recherche scientifique et technologique du Laboratoire national de métrologie et d'essais), qui viennent compléter les compétences riches et variées déjà représentées (géomécanique, géochimie, matériaux, caractérisation, tri et traitement des déchets, mathématiques appliquées, sciences humaines et sociales, environnement, épidémiologie, etc.) (cf. les membres du Conseil scientifique 2020-2025, en Annexes).

Après dix ans à la tête du Conseil scientifique, Christian Fouillac, ancien directeur scientifique du BRGM, a souhaité se retirer pour convenance personnelle. L'Andra a tenu à le remercier pour le travail effectué à la tête du Conseil scientifique au cours de

ces dix années qui ont vu le développement important du projet de centre de stockage Cigéo en vue de la Demande d'autorisation de création et le rôle d'appui des activités scientifiques et technologiques. Pierre Toulhoat, directeur général délégué, directeur scientifique et directeur de l'Institut Carnot du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) jusqu'en 2020, Membre de l'Académie des Technologies et membre du Conseil scientifique de l'Andra depuis 2005, a succédé à Christian Fouillac.

Les travaux de ce « nouveau » Conseil scientifique vont s'inscrire dans une période très importante pour l'Andra avec le dépôt de la Demande d'autorisation de création (DAC) du centre de stockage Cigéo prévue en 2022 et son instruction sur une durée de trois à cinq ans. Cette période est marquée par un enjeu fort des activités scientifiques et technologiques, à la fois en termes de soutien au dossier de DAC du projet de centre de stockage Cigéo, mais aussi en termes d'évolution de ces activités pour répondre aux besoins futurs du projet de centre de stockage Cigéo.

Ainsi, en 2020, le Conseil scientifique s'est notamment prononcé sur la programmation des travaux de R&D de l'Andra en réponse aux enjeux opérationnels de conception et d'évaluation de sûreté du projet de centre de stockage Cigéo à travers deux avis portant sur :

- les enjeux scientifiques de caractérisation et de représentation des calcaires du Barrois en support aux études de conception et d'impacts (zone Descenderie et zone Puits) ;
- les enjeux scientifiques de l'évolution de l'Observatoire pérenne de l'environnement vers un observatoire homme/environnement en réponse à la demande d'évaluation environnementale intégrée.

En parallèle, le Conseil scientifique a poursuivi l'accompagnement de l'Andra dans sa réflexion stratégique sur les futures orientations de sa R&D scientifique et technologique, initiée en 2019, notamment en préparation des étapes qui suivront le dépôt de DAC. La vision stratégique de la R&D scientifique et technologique de demain à l'Andra se déclinera autour de quatre grands axes : (1) maîtriser les

¹⁵ Un des membres nommés en février 2020 ayant démissionné ; un nouveau membre a été nommé par arrêté ministériel en mars 2021.



PIERRE TOULHOAT

Expert indépendant, Président du Conseil scientifique

Le Conseil scientifique de l'Andra a entamé un nouveau mandat au début de 2020. Il s'est renforcé de nouvelles compétences en métrologie, écologie, et géodynamique, tout en gardant les compétences clés en géotechnique, géochimie et radiochimie, sciences des matériaux, numérique, mais aussi en santé et en sciences humaines et sociales. Il s'est réuni en session plénière à trois reprises en 2020 (mars, octobre et décembre), et a mené avec l'Andra quelques réunions dédiées pour approfondir certaines thématiques : l'évolution de l'OPE vers un observatoire homme/environnement, en prenant en compte la notion

de services écosystémiques, et le renforcement des études sur les Calcaires du Barrois. L'Andra a déposé en 2020 pour Cigéo une demande de Déclaration d'utilité publique (DUP), et s'apprête à soumettre début 2022 une Demande d'autorisation de création (DAC). C'est donc une période clé pour l'Agence qui doit s'appuyer pour ces dossiers sur le meilleur état de l'art scientifique, et avec le concours du Conseil scientifique se doter d'une stratégie scientifique renouvelée pour les cinq ans à venir. La feuille de route de notre conseil est déjà bien remplie !

TÉMOIGNAGE
MAGUELONNE
CHAMBON

risques et optimiser les stockages et filières de gestion des déchets, (2) poursuivre le déploiement de la transition numérique et des outils 4.0 de l'observation/surveillance des stockages, (3) renforcer l'approche environnementale intégrée au cœur des actions de l'Andra et (4) appréhender les transformations de la société et soutenir le dialogue avec les parties prenantes. Transversalement à ces grands axes s'ajoute la nécessité d'une logique systémique de la gestion des déchets et matières radioactives et l'articulation de la R&D de l'Andra avec la R&D sur les déchets, menée par les producteurs. Cette vision stratégique de la R&D scientifique et technologique de l'Andra, établie à un horizon de dix ans, sera partagée dès 2021 avec les partenaires de l'Agence.

LE RENOUVELLEMENT DU COMITÉ D'ORIENTATION ET DE SUIVI DU LABORATOIRE SOUTERRAIN (COS)

Depuis sa création, le Comité d'orientation et de suivi du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne (COS) contribue, par son expertise et ses évaluations, au développement du Laboratoire souterrain et de sa capacité à répondre aux objectifs et jalons successifs du développement du projet de centre de stockage Cigéo.

Le projet Cigéo est aujourd'hui engagé dans la dynamique de remise du dossier de Demande d'autorisation de création prévue en 2022 puis après son instruction sur une durée de trois à cinq ans, si l'autorisation était donnée, le démarrage du projet du centre de stockage Cigéo par la construction et l'exploitation de la phase industrielle pilote. Le Laboratoire souterrain sera un des outils scientifiques et technologiques majeur pour accompagner l'instruction et préparer la phase industrielle pilote, notamment à travers la nouvelle campagne de creusement lancée en 2019 pour une durée de cinq ans. Ce chantier 4 constitue une étape importante du développement du Laboratoire souterrain, en lien

avec le développement du projet de centre de stockage Cigéo et dans une logique d'industrialisation accrue. Il sera fortement dominé par la technologie des travaux souterrains et le couple technologie des travaux souterrains/comportement phénoménologique des ouvrages souterrains du stockage, notamment des alvéoles de stockage, avec des démonstrateurs à échelle réelle du centre de stockage Cigéo, associés à des expérimentations scientifiques intégrées (géochimie, géologie, hydraulique-gaz, géomécanique, matériaux, radionucléides, monitoring, etc.) afin de consolider la maîtrise des processus phénoménologiques du stockage.

L'Andra a renouvelé en 2020 son Comité d'orientation et de suivi du Laboratoire souterrain pour l'accompagner sur la durée de ce nouveau chantier. Christophe Nussbaum (directeur du laboratoire souterrain du mont Terri) et Jean Sulem (responsable de l'équipe Géotechnique-CERMES du laboratoire Navier) ont ainsi rejoint les membres du COS, succédant à Paul Bossart et Philippe Velut qui ont souhaité se retirer pour convenance personnelle (cf. les membres du COS 2020-2024, en Annexes).



Photographie du déblaiement d'une galerie en cours de creusement au Laboratoire souterrain



MAGUELONNE CHAMBON

Directrice de la recherche scientifique et technologique du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE)

L'Andra a une mission d'intérêt général qu'est la gestion à long terme des déchets radioactifs, pour assurer la protection de l'homme et de l'environnement. Le Conseil scientifique permet de donner une vision externe des orientations et axes de recherche pour permettre d'atteindre les objectifs fixés.

Ces derniers mois, le Conseil scientifique a eu pour mission d'examiner les orientations stratégiques de la R&D par grandes thématiques. Ce qui rend la participation passionnante, à ce Conseil, est la pluridisciplinarité des sujets étudiés. Ceux-ci concernent aussi bien les sciences physique, chimique ou mathématique, mais aussi les sciences humaines et sociales, les problématiques environnementales étant au cœur des préoccupations des citoyens.

À cela s'ajoutent pour l'Andra la complexité et une difficulté majeure de défis face au temps, compte tenu des enjeux : prévoir dès maintenant ce qui doit fonctionner pendant des dizaines d'années, avec une anticipation des évolutions et innovations techniques. La transformation numérique est bien sûr partie intégrante de cette vision stratégique.

En tant que métrologue, nous savons combien ce type de travail demande une approche globale pour permettre que des projets d'une telle envergure aboutissent. Le système métrique ne s'étant pas fait en un jour...

LE RENOUVELLEMENT DU COMITÉ D'ORIENTATION ET DE SUIVI DE L'OBSERVATOIRE PÉRENNE DE L'ENVIRONNEMENT (COS-OPE)

Le rôle de l'Observatoire pérenne de l'environnement vis-à-vis du projet de centre de stockage Cigéo et du territoire, la diversité des actions scientifiques entreprises ou à entreprendre et la diversité des acteurs, a nécessité une gouvernance scientifique plus rapprochée, assurée depuis 2015 par le Comité d'orientation et de suivi de l'Observatoire pérenne de l'environnement (COS-OPE), en lien le Conseil scientifique (son président est membre du Conseil scientifique), et en cohérence avec les partenaires scientifiques de l'Andra pour l'OPE.

Depuis 2018, le COS-OPE a été un acteur clé de l'évolution de l'OPE en l'accompagnant dans le développement d'une vision intégrée des interactions homme/environnement à travers la mise en œuvre d'outils de description, d'analyse et de monitoring des services écosystémiques du territoire. En plaçant l'homme au centre de son environnement, cette approche permet de faire le lien entre les systèmes écologiques et les systèmes anthropiques, dans une perspective de gestion durable des milieux naturels.

L'OPE poursuit à présent son évolution, en visant notamment à accroître son insertion dans le territoire en participant pleinement à sa dynamique environnementale, au-delà du seul cadre du centre de stockage Cigéo, pour devenir un outil du territoire, lui donnant des clés de lecture de sa trajectoire environnementale et lui permettant de contribuer à la définir et l'évaluer. Le COS-OPE, reconduit dans son ensemble en 2020 pour cinq ans (cf. les membres du COS-OPE 2020-2025, en Annexes), a d'ores et déjà entamé une réflexion sur ses modes de travail pour accompagner l'Andra dans cette nouvelle phase d'évolution de l'OPE vers un observatoire homme/environnement en réponse à la demande d'évaluation environnementale intégrée.



Photographie de la collecte d'échantillons environnementaux pour l'OPE

UN BILAN À MI-PARCOURS DU COMITÉ TECHNIQUE SOUTERRAIN (CTS)

Le 28 mars 2018, l'Andra a lancé son Comité technique souterrain (CTS). Constitué d'experts extérieurs indépendants, ce comité a pour mission d'émettre des avis et recommandations sur les activités de l'Andra dans le domaine des ouvrages et travaux souterrains, notamment en lien avec le projet de centre de stockage Cigéo. Créé pour une durée de cinq ans renouvelable, le CTS est constitué de onze membres français et étrangers, reconnus pour leur expertise dans le domaine d'activité considéré, et apportant leur retour d'expérience au profit d'une installation qui associe les contraintes du milieu souterrain avec les exigences de sûreté nucléaire (en opération et à long terme).



Photographie des membres du CTS lors de la réunion de lancement

La mission du CTS est de compléter les réflexions techniques des études de la maîtrise d'œuvre :

- évaluer/orienter le déroulement des études liées à la conception des ouvrages souterrains menées par l'Andra, puis à leur réalisation ;
- émettre des avis critiques sur l'interprétation des choix techniques déjà retenus ou aider/orienter vers les choix technico-économiques pertinents ;
- contribuer à l'analyse/réorganisation de la rédaction des rapports réalisés en vue des dossiers relatifs aux nouveaux projets de l'Andra et en premier lieu ceux du projet de centre de stockage Cigéo, associés aux différents jalons structurants du projet (APD, PRO, etc.) ainsi qu'au dossier de DAC.

Après trois ans de fonctionnement, 2020 a permis de tracer un premier bilan très positif du fonctionnement et des apports du comité. Le CTS a été saisi 11 fois avec 11 avis et recommandations rendus sur les sujets techniques des travaux souterrains et de sûreté nucléaire.

En 2020, les sujets traités ont été nombreux et très orientés sur la préparation de la demande d'autorisation de création du projet de centre de stockage Cigéo : pertinence du choix du tunnelier pour la descenderie, conception/réalisation des carrures, déploiement des ouvrages souterrains sous l'angle « Sécurité Incendie, Ventilation, Génie Civil », passage entre locaux de classe de confinement C2 et C4 pour la ventilation nucléaire de l'EP1, loi de comportement géotechnique et dimensionnement des ouvrages souterrains, projet d'allotissement des travaux souterrains, scellements dans les zones réalisées au tunnelier avec dépose des voussoirs.

06

Une participation soutenue à la diffusion de la culture scientifique auprès du public

La gestion des déchets radioactifs est un sujet de société qui concerne tous les citoyens. C'est pourquoi l'Andra a mis en place une démarche de dialogue donnant à chacun les moyens de s'approprier les enjeux et d'exprimer son point de vue. Cela passe notamment par la diffusion de la culture scientifique et des savoirs que l'Andra produit et par des modalités qui se veulent innovantes afin de toucher et d'impliquer le plus large public, en particulier les jeunes, incarnation des générations futures.

En 2020, dans le contexte de la crise sanitaire, l'Andra a privilégié les médias en ligne pour garder le contact avec le public et continuer à répondre à leurs questions.



DES VISITES VIRTUELLES DES SITES ET DES CONFÉRENCES EN LIGNE

Les visites de sites sont un moyen privilégié pour faire connaître les activités de l'Andra et échanger avec les publics. Compte tenu des contraintes liées à la situation sanitaire, l'Andra a souhaité continuer à faire découvrir ses sites, en proposant des visites virtuelles du Laboratoire souterrain et du Centre de stockage de l'Aube.

Entre juillet et novembre 2020, une série de Web conférences a également été organisée autour du projet Cigéo (« Cigéo : où, quand, comment ? », « Cigéo : quels risques ? quels impacts ? », « Laboratoire souterrain : 20 ans de recherche pour Cigéo ») et, plus largement des questions que peuvent susciter les activités de l'Agence (« Faut-il avoir peur de vivre à côté d'un centre de stockage de déchets radioactifs ? »).

En savoir plus

- **La visite virtuelle du Laboratoire souterrain :**
<https://meusehaute-marne.andra.fr/mini-sites/visite-virtuelle/>
- **La visite virtuelle du centre de stockage de l'Aube :**
<https://aube.andra.fr/mini-sites/aube/visite-virtuelle/>

UN DIALOGUE INNOVANT

Dans un podcast intitulé « 100 000 ans », Binge Audio, en partenariat avec l'Andra, a proposé aux internautes une enquête en six épisodes, diffusée entre octobre et novembre 2020, dans laquelle la journaliste et documentariste Anne-Cécile Genre appréhende le rapport au temps long.

C'est également en 2020 qu'ont été choisis les deux gagnants du concours d'écriture lancé fin 2019 par l'Andra, en partenariat avec Usbek & Rica, sur le devenir des déchets radioactifs. À travers ce concours, l'Agence a souhaité donner carte blanche aux amateurs de science-fiction pour contribuer à leur manière, grâce à leur vision de l'avenir, au débat sur la gestion des déchets radioactifs. Par sa capacité à stimuler l'imaginaire, la science-fiction offre un espace de liberté pour interroger le futur de nos sociétés et permettre à chacun de se positionner dès à présent sur les implications philosophiques, politiques et sociétales du sujet.



Visuel du podcast « 100 000 ans »

LA DIFFUSION DE LA CULTURE SCIENTIFIQUE SUR LES TERRITOIRES D'IMPLANTATION DE L'ANDRA

L'Andra organise régulièrement des manifestations sur ses centres, en lien avec les grands rendez-vous nationaux ou régionaux à caractère scientifique, technique ou environnemental. Cette programmation s'inscrit dans la démarche d'information, mais aussi d'ouverture et de diffusion de la culture scientifique et technique de l'Agence. 2020 n'a pas dérogé à cette volonté :

- l'exposition « Voyage dans le système solaire et au-delà », organisée au Centre de Meuse/Haute-Marne, a accueilli petits et grands pour découvrir les planètes et les astres ;
- dans l'Aube, une conférence a été proposée au public sur le projet Sanctuary visant à sauvegarder sur la Lune la mémoire de l'humanité gravée sur des disques de saphir ;
- enfin, dans la Manche, à l'automne, l'Andra a participé au village des sciences de Cherbourg et a apporté son soutien au planétarium Ludiver en proposant des conférences-visites de l'exposition photographique « Des volcans & des hommes » qui y était organisée.



Photographie de l'exposition « Voyage dans le système solaire et au-delà »

07

Annexes

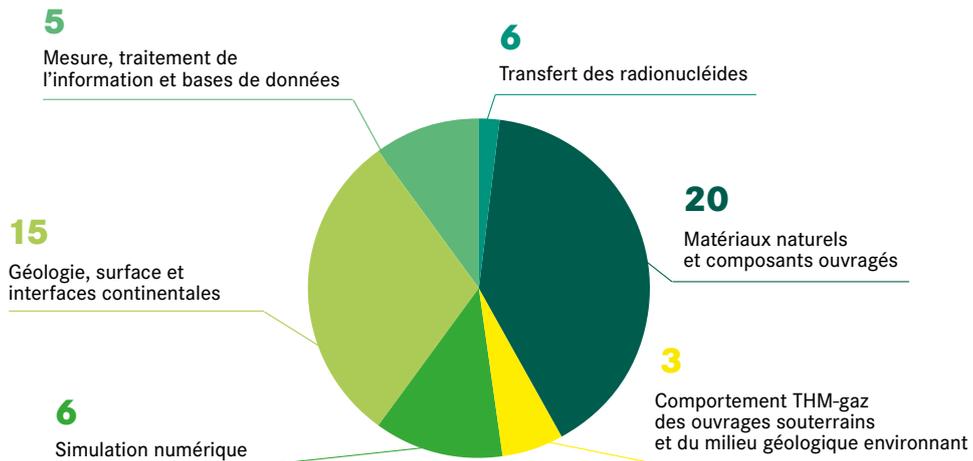


LES PUBLICATIONS

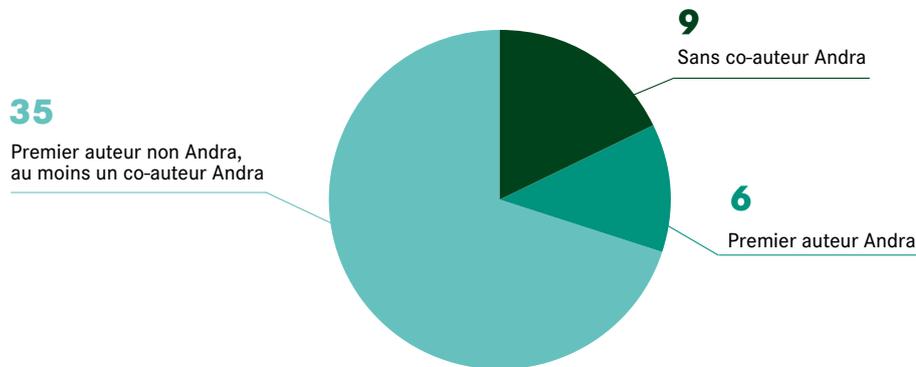
S'appuyant sur plus de 50 ans d'expertise dans le stockage des déchets radioactifs, l'Andra contribue activement à la diffusion de la connaissance et des savoir-faire scientifiques et techniques.

En 2020, malgré le contexte sanitaire, l'Agence a partagé largement ses connaissances avec la communauté scientifique

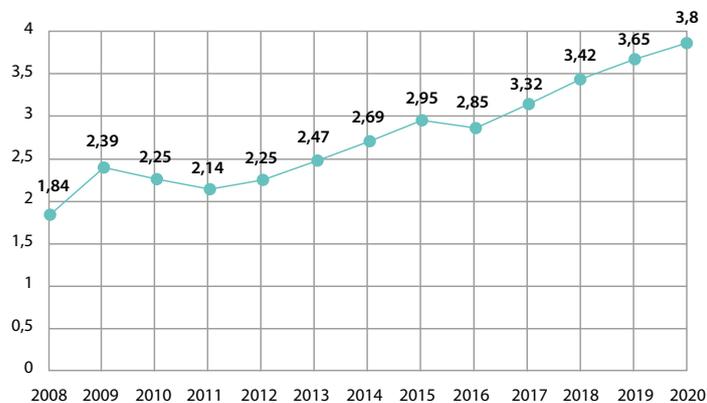
française et internationale, *via* des publications dans des revues à comité de lecture et des interventions dans des manifestations scientifiques, par ses équipes et/ou ses partenaires de recherche et d'études scientifiques et technologiques. L'Andra a ainsi contribué à la publication de 50 articles dans des revues de rang A¹⁶, avec un *impact factor* moyen de 3,8.



Répartition par thématique scientifique des publications de l'Andra et de ses partenaires dans des revues de rang A en 2020



Répartition par appartenance des auteurs des publications de l'Andra et de ses partenaires dans des revues de rang A en 2020



Évolution de l'impact factor moyen des publications scientifiques de l'Andra et de ses partenaires dans des revues de rang A depuis 2008

¹⁶ La liste de ces publications est disponible sur le site internet de l'Andra : <https://www.andra.fr/sites/default/files/2021-03/Articles%20publi%C3%A9s%20en%202020.pdf>

LES BREVETS PUBLIÉS EN 2020 DANS LE DOMAINE DE LA R&D SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

Numéro du brevet	Date de dépôt	Date de publication	Titre	Titulaire
FR3086703	27/09/2018	03/04/2020	Moteur hydraulique à eau	Andra
FR3089221	30/11/2018	05/06/2020	Procédé de fabrication d'un objet en béton moulé	Andra
FR3091868	18/01/2019	24/07/2020	Béton mousse compressible et son utilisation	Andra, Cerib
FR3091892	18/01/2019	24/07/2020	Ensemble de construction pour la réalisation d'un voussoir préfabriqué bicouche apte à être assemblé sur site et procédé de réalisation d'un tel voussoir	Andra, Cerib
FR3092108	25/01/2019	30/07/2020	Composition pour la formation d'un géopolymère à propriétés ignifuges et mécaniques améliorées, procédé de fabrication de ce géopolymère et ses utilisations (Projet PIA INIFUGE) (extension WO2020 152638)	Andra, CNRS, université de Limoges
FR3092835	14/02/2019	21/08/2020	Composition pour le conditionnement des déchets radioactifs et procédé de conditionnement (Projet PIA Matrice)	Andra, CEA, Vicat
FR3096366	20/05/2019	27/11/2020	Composition pour la formation de composite à matrice géopolymère, procédé de fabrication de ce composite et ses utilisations	Andra, CNRS, ENPC, université de Limoges
US20200400593	19/06/2019	24/12/2020	Caméra Compton à capture multiple et procédé d'imagerie (Projet PIA TEMPORAL) (extension WO2020254673)	Andra, DAMAVAN IMAGING
FR3097656	31/01/2020	25/12/2020	Caméra Compton et procédé d'imagerie 3D Compton (Projet PIA TEMPORAL) (extension WO2020254653)	Andra, DAMAVAN IMAGING
FR3097655	31/01/2020	24/12/2020	Procédé d'imagerie utilisant conjointement une reconstruction PET et une reconstruction Compton, de préférence en Compton 3D (Projet PIA TEMPORAL) (extension WO2020254649)	Andra, DAMAVAN IMAGING

LES THÈSES DE L'APPEL À PROJETS DE THÈSES ANDRA

UN SOUTIEN AUX THÈSES EN COURS POUR RÉPONDRE À LA CRISE SANITAIRE EN 2020

La recherche doctorale, avec des thèses toujours plus nombreuses au sein de l'Andra, s'est poursuivie en 2020 avec un total de 22 thèses en cours, issues des appels à projets de thèses Andra et menées en collaborations avec des laboratoires universitaires ou de recherche français.

En 2020, la crise sanitaire a directement impacté l'avancement des travaux scientifiques menés par les doctorants. Après avoir échangé avec les laboratoires d'accueil partenaires, l'ensemble des conventions de thèse des étudiants de deuxième et troisième année a été prolongé de trois mois pour compenser les fermetures des installations durant le confinement.



1 sur la mesure, le traitement de l'information et bases de données



1 sur la simulation numérique



2 sur le transfert des radionucléides



4 sur la géologie, la surface et les interfaces continentales



5 sur le comportement THM-gaz des ouvrages souterrains et du milieu géologique environnant



9 sur les matériaux naturels et les composants ouvragés

Répartition par thématique scientifique des thèses Andra en 2020

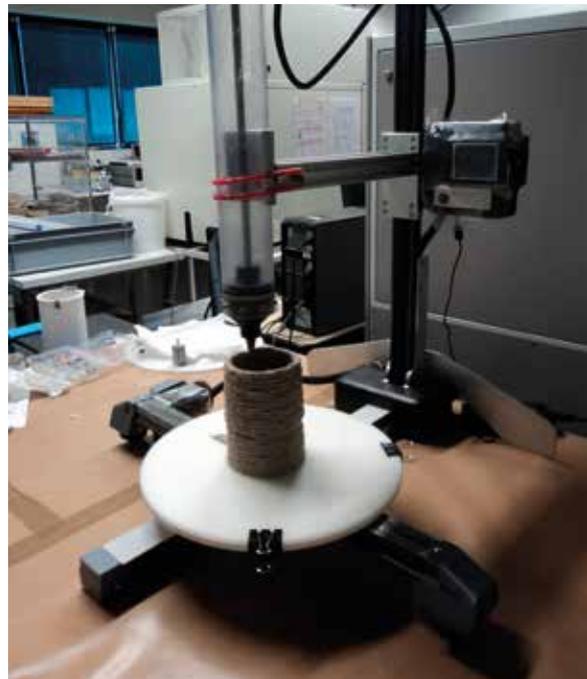
LES THÈSES SOUTENUES EN 2020

Matériaux naturels et composants ouvragés

- **Formulations de composites à base de liants basse température type géopolymère à base d'argilite et de différents renforts**, par Julien Archez, Laboratoire Navier – École nationale des ponts et chaussées et IRCER – Institut de recherche sur les céramiques (25/11/2020) - <http://www.theses.fr/2020LIMO0059/document>

Dans une logique prospective de développement de nouveaux matériaux « neutres » vis-à-vis du fonctionnement du stockage, les matériaux composites à matrice et renforts inorganiques, sont une des voies d'innovation envisagées en alternative aux matériaux métalliques. Les travaux de thèse ont étudié l'utilisation, pour les

chemisages des alvéoles de stockage des déchets HA du centre de stockage de Cigéo, de matériaux de type géopolymères, élaborés à base d'argilites et renforcés par des éléments non organiques. Les formulations ont été développées pour permettre une mise en forme par coulage ou par fabrication additive, tout en assurant une tenue mécanique satisfaisante du matériau consolidé. Pour tester la solution extrudée à l'échelle 1/2, un système d'impression 3D a ensuite été développé et un prototype échelle 1/2 a été réalisé par fabrication additive (cf. La fabrication additive d'un prototype à l'échelle 1/2 d'un chemisage d'alvéole de stockage de déchets HA innovant en composite géopolymère à base d'argilites pour plus de détails sur la thèse).



Photographie de la fabrication additive d'un prototype à l'échelle 1/2 d'un chemisage d'alvéole de stockage de déchets HA en composite géopolymère à base d'argilites

Comportement THM gaz des ouvrages souterrains et du milieu géologique environnant

- **Propriétés hydromécaniques à moyen et long termes de matériaux à base d'argilites excavées pour la fermeture des ouvrages de stockage**, par Marvin Middelhoff, Laboratoire énergies et mécanique théorique et appliquée (LEMETA) – Université de Limoges (18/12/2020) - <http://www.theses.fr/2020LORR0239/document>

Le principe des ouvrages de fermeture repose sur l'utilisation d'un matériau dont les caractéristiques (perméabilité à l'eau, plasticité, gonflement à l'eau, et comportement aux sollicitations mécaniques, hydrauliques et gaz), permettent *in fine* de garantir la fonction de limitation de la circulation de l'eau dans le stockage en après-fermeture. Dans le cadre des travaux de définition d'un domaine de composition des noyaux des scellements et remblais répondant aux exigences de l'Andra, la thèse a étudié le comportement

hydromécanique de différents matériaux élaborés à partir d'argilites (mélanges argilites et bentonite) et notamment leurs variations de volume et de conductivité hydraulique en fonction des conditions géo-environnementales (fraction de smectite, diamètre de grain maximum de la fraction de bentonite dans le mélange, densité sèche initiale, degré de saturation, chimie de la solution saturante, etc.), en lien à la mise en œuvre de ces matériaux.

Mesure, traitement de l'information et bases de données

- **Tunnel structural health monitoring in radioactive environment based on special distributed optical fibre strain sensing cables** (Projet européen ITN-Finesse), par PICCOLO Arianna, université de Nantes (17/07/2020) - <http://www.theses.fr/2020NANT4063/document>

Dans le cadre global de l'étude de dispositifs d'observation/surveillance des alvéoles de stockage des déchets HA pour le centre de stockage Cigéo, les travaux de la thèse, financées par le projet européen ITN-Finesse¹⁷, ont porté sur l'interprétation de mesures de déformations orthoradiales acquises par fibres optiques, jauges ou tout autre capteur. La convergence des alvéoles de stockage (réduction progressive de leur section) doit être mesurée par des systèmes peu intrusifs, sensibles et compatibles avec un environnement sévère. Différentes problématiques ont été traitées au cours de la thèse, depuis la modélisation des structures par éléments finis jusqu'à l'évaluation de l'impact de l'environnement du centre de stockage Cigéo (température, présence d'hydrogène et de radiations) sur les capteurs, dont les fibres et les câbles.

Les responsables des activités scientifiques et technologiques à l'Andra



Frédéric PLAS

Directeur de la recherche et développement



Marc LEGUIL

Directeur de l'ingénierie (jusqu'à fin octobre 2021)



Pour plus d'information sur les activités scientifiques et techniques de l'Andra, vous pouvez contacter **Marie-Anne Bruneaux**, Responsable de la valorisation des savoirs, des savoir-faire et des outils scientifiques, Direction de la Recherche et Développement (marie-anne.bruneaux@andra.fr)

¹⁷ Pour plus d'informations sur le projet européen ITN-Finesse : <http://itn-finesse.eu/>

LES MEMBRES DU CONSEIL SCIENTIFIQUE ET DES COMITÉS SCIENTIFIQUES SPÉCIALISÉS

Les membres du Conseil scientifique 2020-2025

Eduardo ALONSO	Professeur émérite de l'université polytechnique de Catalogne (Espagne)
Philippe BEHRA	Professeur des universités – École nationale supérieure des ingénieurs en arts chimiques et technologiques (ENSIACET) – Institut national polytechnique (INP) de Toulouse
Maguelonne CHAMBON	Directrice de la recherche scientifique et technologique du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE)
Marc DEMARCHE	Directeur général de l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF - Belgique)
Cécile FERRY	Adjointe au chef de programme Cycle nucléaire, responsable du domaine de R&D sur la « gestion des déchets », à la Direction des énergies du CEA
Stéphane GUILLOT	Directeur Adjoint Scientifique en charge du domaine Terre Solide – Institut national des sciences de l'Univers du CNRS (INSU)
Gabrielle HECHT	Professeur au département d'histoire de l'université de Stanford (États-Unis)
Isabelle HERLIN	Directrice du centre d'expertise français du Programme mondial en intelligence artificielle et coordinatrice du Programme national de recherche en intelligence artificielle
Yvan LAGADEUC	Professeur à l'université de Rennes 1 au sein du laboratoire Écosystèmes, Biodiversité, Évolution – ECOBIO
Roger SALAMON	Directeur honoraire de l'Institut de santé publique, d'épidémiologie et de développement (ISPED)
Jean-Michel TORRENTI	Directeur du département matériaux et structures de l'université Gustave Eiffel
Pierre TOULHOAT	Expert indépendant – Directeur Général Délégué, Directeur Scientifique et Directeur de l'Institut Carnot du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) jusqu'en 2020. Président du Conseil scientifique
Patrick LANDAIS	Haut-Commissaire à l'énergie atomique, membre de droit

Les membres du COS 2020-2024

Michel DEFFAYET	Directeur du GETU (Centre d'étude des tunnels)
Frédérique FOURNIER	Directrice du Centre géoressources et énergie de l'IFP School de l'IFPEN (IFP Énergies nouvelles)
Laurent MICHOT	Directeur de recherches au CNRS – Directeur du Laboratoire PHENIX (UMR 8234 – Physicochimie des électrolytes et nanosystèmes interfaciaux) Président du COS
Christophe NUSSBAUM	Directeur du laboratoire souterrain du mont Terri (Swisstopo)
Pascal ROYER	Professeur à l'université de technologie de Troyes, dans les domaines de l'optique, de la nanophotonique, des nanosciences et des nanotechnologies
Franck SCHOEFS	Professeur à l'université de Nantes – Institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM)
Jean SULEM	Professeur à l'École des Ponts ParisTech – Responsable de l'Équipe Géotechnique-CERMES du laboratoire Navier
Michel VANDENBEUSCH	Expert en hydrogéologie, ancien responsable « stockages » d'ANTEA

Les membres du COS-OPE de 2015-2020

Gilles BERGAMETTI	Directeur de recherche au CNRS au Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA)
Frédéric DELAY	Professeur à l'université de Strasbourg, Laboratoire d'hydrologie et de géochimie de Strasbourg (LHyGeS)
Marc VOLTZ	Directeur de recherche à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)
Yvan LAGADEUC	Professeur à l'université de Rennes 1 au sein du laboratoire Écosystèmes, Biodiversité, Évolution – ECOBIO Président du COS-OPE
Nathalie MACHON	Professeur d'écologie au Muséum national d'histoire naturelle de Paris
André MARIOTTI	Professeur émérite UPMC Sorbonne-Université – Membre honoraire de l'Institut universitaire de France
Frédéric VILLIERAS	Directeur de recherche au CNRS – Vice-Président du Conseil scientifique de l'université de Lorraine

Les membres du Comité technique souterrain (CTS)

Tarcisio B. CELESTINO	Ex-Président de l'AITES (Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain), professeur à l'université de São Paulo et consultant expert
Michel DEFFAYET	Directeur du Centre d'études des tunnels (CETU), Président de l'AFTES (Association française des tunnels et de l'espace souterrain) Président du CTS
Denis GIORDAN	Lieutenant-colonel SDIS de Savoie, directeur départemental adjoint, conseiller technique risques radiologiques et nucléaires
Alain GUILLOUX	Consultant indépendant, ex-Directeur de Terrasol (ex-SETEC), membre du Comité d'experts de Grand Paris Express
Pierre HINGANT	Expert tunnels méthodes et travaux (ex-EGIS)
Alain LE GAC	Expert EDF (aspects nucléaires), Directeur adjoint de la Direction R&D EDF, ex-Directeur du CNPE Nogent
Christian MAQUAIRE	Consultant indépendant, ex-conseiller du PDG d'Eurotunnel, ex-directeur industriel et maître d'ouvrage de la reconstitution du tunnel sous la Manche, membre du Comité industriel de l'Andra
Jack-Pierre PIGUET	Consultant indépendant, ancien Directeur du Laboratoire souterrain de l'Andra en Meuse/Haute-Marne, ex-Directeur de l'École des mines de Nancy
Alain ROLLET	Consultant indépendant, ex-liquidateur amiable de MDPA (Mines de potasse d'Alsace), ancien membre du Comité industriel de l'Andra
Alain VIAL	Expert souterrains, spécialiste des tunneliers (ex-Vinci Grand Projet)
Joël VUILLON	Expert indépendant en ventilation nucléaire et sûreté

TABLE DES SIGLES

ACTRIS	Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure
AEN	Agence pour l'énergie nucléaire
AFTES	Association française des tunnels et de l'espace souterrain
AHA	Démonstrateur d'Auscultation des alvéoles de stockage HA (mené au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AK-MCS	Active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo Simulation
ALC	Alvéole de stockage de déchets HA (expérimentations menées au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
AllEnvi	Alliance de recherche pour l'environnement
AMORAD	Projet ANR « Amélioration des MOdèles de prévisions de la dispersion et de l'évaluation de l'impact des RADionucléides dans les milieux marins et terrestres »
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
ANR	Agence nationale de la recherche
APD	Avant-projet détaillé
Atmo Grand Est	Association agréée par le ministère en charge de l'environnement pour la surveillance réglementaire de la qualité de l'air dans la région Grand Est
ASN	Autorité de sûreté nucléaire
AUS	Frein d'arrêt d'ultime secours
BfE	Bundesamts für kerntechnische Entsorgungssicherheit, TSO allemand
BIM	Building Information Modelling
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
BUT	Butoir du chariot de freinage du système funiculaire de descente des colis de stockage
CAO	Conception assistée par ordinateur
CDZ	Compression mécanique de l'EDZ (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CETIM	Centre technique des industries mécaniques

CETU	Centre d'études des tunnels
CF	Courant de Foucault
CFD	Computational fluid dynamics
Cigéo	Centre industriel de stockage géologique
CMHM	Centre de Meuse/Haute-Marne
CND	Contrôle non destructif
CNE	Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
COMPTONCAM	Projet PIA « Développement d'une gamma caméra portative ultra-sensible pour la localisation et la caractérisation de déchets radioactifs de démantèlement »
COS	Comité d'orientation et de suivi du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne
COS-OPE	Comité d'orientation et de suivi de l'Observatoire pérenne de l'environnement
Cox	Callovo-Oxfordien
CRQ	Comportement thermo-hydro-mécanique représentatif du Callovo-Oxfordien autour d'un quartier HA (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
CTS	Comité technique souterrain
CSM	Centre de stockage de la Manche
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear, TSO espagnol
DAC	Demande d'autorisation de création
DDM	Data-driven modelling
DECOVALEX	Projet « Development of coupled models and their validation against experiments »
DISCO	Projet Euratom « Modern Spent Fuel Dissolution and Chemistry in Failed Container Conditions »
DUP	Déclaration d'utilité publique
EDF	Électricité de France
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, TSO suisse

ENRESA	Empresa nacional de residuos radiactivos, homologue espagnol de l'Andra
EP1	Bâtiment nucléaire de surface pour la gestion des déchets MA-VL et quartier pilote HA
EURAD	European joint programme on radioactive waste
Euratom	Programme de recherche et de formation de la Communauté européenne de l'énergie atomique
FANC	Federal Agency for Nuclear Control, TSO belge
FAU	Frein d'arrêt d'urgence
FA-VL	Faible activité à vie longue
FZJ	Forschungszentrum Juelich GmbH (Allemagne)
GET	Galerie expérimentale trois
GES	Gaz à effet de serre
GEX	Galerie expérimentale du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne
GRD	Galerie de recherche et développement
GSL	Galson Sciences Limited (Royaume-Uni)
H2MEMS	Projet PIA « Microsystèmes résonants pour la détection d'hydrogène dans les ouvrages de stockage de déchets radioactifs »
HA	Haute activité
HAE	alvéole de stockage de déchets HA et Echanges gazeux (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCM	Processus hydriques, chimiques et mécaniques
HIP	Hot Isostatic Pressing
IA	Intelligence artificielle
ICOS	Integrated Carbon Observation System
IFPEN	IFP Énergies nouvelles
IFSTTAR	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

Ineris	Institut national de l'environnement industriel et des risques
INRAE	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
INRAE-BEF	Unité de recherche biogéochimie des écosystèmes forestiers de l'INRAE
IRCER	Institut de recherche sur les céramiques
IRSN-OPERA	Institut de recherche en sûreté nucléaire – Observatoire permanent de la radioactivité
ISSKA	Institut suisse de spéléologie et de karstologie
JAEA	Japan Atomic Energy Agency (Japon)
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley Lab), University of California/United States Department of Energy (DOE)
LEI	Lithuanian Energy Institute (Lituanie)
LS	Laboratoire souterrain de l'Andra en Meuse/Haute-Marne
LSCE	Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, université Paris-Saclay
MATRICE	Projet PIA « Matériaux résistants à l'irradiation à base de ciment »
MA-VL	Moyenne activité à vie longue
MOX	Mixed OXide (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium)
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, homologue suisse de l'Andra
NNL	National Nuclear Laboratory (Royaume-Uni)
NWMO	Nuclear Waste Management Organization, homologue canadienne de l'Andra
OMA	Démonstrateur d'ouvrage MA-VL
Ondraf / Niras	Organisme national belge de gestion des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, homologue belge de l'Andra
OPE	Observatoire pérenne de l'environnement
PBM	Physics Based Models
PDE	Partial differential equations
PGZ	Perturbation hydromécanique induite par les GaZ dans l'argilite saine (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)

PIA	Programme d'investissement d'avenir
PIVIC	Projet PIA « Procédé d'incinération-vitrification in can »
POSIVA	WMO, homologue finlandaise de l'Andra
PREDIS	Projet Euratom « Pre-disposal management of radioactive waste »
PRO	Étude de projet
PSI	Paul Scherrer Institute (Suisse)
QUINTESSA	Technical and strategic consultancy, research and software in the field of low carbon energy (Royaume-Uni)
REs	Organismes de recherche
REI	Résine échangeuse d'ions
RTC	Revêtement Traditionnel avec couche Compressible (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
RTG	Projet PIA « Radio-isotopic Thermal Generator (Générateur autonome isotopique) »
RWM	Radioactive Waste Management, homologue britannique de l'Andra
RWMC	Radioactive Waste Management Funding and Research Centre (Japon)
SAGD	Système d'Acquisition et de Gestion des Données scientifiques acquises au Centre de Meuse/Haute-Marne
SCCoDRa	Projet PIA « Suivi et contrôle de la corrosion des composants métalliques pour le stockage des déchets radioactifs »
SCK-CEN	The Belgian Nuclear Research Centre (Belgique)
SE	Service écosystémique
SKB	Organisme suédois de gestion des déchets radioactifs, homologue suédois de l'Andra
SBR	Shaft Boring Roadheader, tunnelier vertical
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten, TSO suédois
TBM	Tunnel boring machine, tunnelier
TED	Propriétés et effets en température deux (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
TEMPORAL	Projet PIA « Spectromètre imageur de rayons gamma basé sur une méthode d'imagerie temporelle pour le démantèlement nucléaire »

TFA	Très faible activité
THERAMIN	Projet Euratom « Thermal treatment for radioactive waste minimisation and hazard reduction »
THM	Thermique, hydraulique-gaz et mécanique
THMC	Thermique, hydraulique-gaz, mécanique et chimique
TOFD	Time of Flight Diffraction
TPV	Tunnelier avec pose de voussoirs (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
TRIPS	Transfer of Radionuclides In Perennial vegetation Systems
TRU	Transuranic waste
TSF	Transmission sans Fil (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
TSO	Technical Support Organisation (exemple : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire en France)
USFD	Université de Sheffield (Royaume-Uni)
UFZ	Helmholtz-Centre for Environmental Research GmbH (Allemagne)
VSM	Vertical Shaft sinking Machine, tunnelier vertical
VTT	Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy (VTT Technical Research Centre of Finland Ltd)
VUJE	VUJE a.s. (Slovaquie) (nuclear power engineering)
WMO	Waste Management Organisation (exemple : Andra en France)
WP	Work package



**AGENCE NATIONALE
POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS**
1-7, rue Jean Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
Tél. : 01 46 11 80 00
www.andra.fr