



RAPPORT D'ACTIVITÉS

# SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

2018-2019





0

1

2

3

4





Organisme public chargé d'une mission d'intérêt national, la gestion des déchets radioactifs, l'Andra se doit d'asseoir ses activités de définition des filières de gestion, et de conception, exploitation et évaluation de sûreté des centres de stockages existants ou en projet sur des bases scientifiques et techniques solides. Véritable architecte-ensemblier scientifique, l'Andra mobilise pour ce faire l'excellence scientifique et technique, nationale et internationale : les nombreux partenariats de R&D et la participation de l'Andra à des projets de recherche et développement nationaux et internationaux, en particulier européens, très souvent à caractère pluridisciplinaire au regard des sujets à traiter, témoignent de cette mobilisation.

Les travaux de recherche et innovation de l'Andra s'inscrivent non seulement à court et à moyen terme, mais aussi à long terme dans une logique prospective et de progrès continu, au regard notamment des temps longs et de la progressivité du développement des stockages de déchets radioactifs.

Le rapport d'activités scientifiques et techniques 2018-2019 souligne ainsi la forte dynamique de travaux scientifiques et techniques portés par l'Andra, au travers notamment de la diversité des sujets traités et des acteurs mobilisés, ainsi que l'apport des résultats obtenus aux activités de l'Andra.

**Les années 2018-2019 auront ainsi été particulièrement importantes à plusieurs titres :**

- en 2019, avec 22 rencontres organisées dans toute la France, le débat public sur le Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNMGDR), organisé par la Commission particulière du débat public avec, comme maîtres d'ouvrage du Plan, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et la Direction générale de l'énergie et du climat (DGE), aura permis de clarifier les différents enjeux du Plan pour éclairer les décisions à venir. Cela concerne notamment des thèmes comme la requalification ou non de certaines matières en déchets, les possibilités de dérogation par zonage des déchets de très faible activité (TFA), la définition d'une ou de plusieurs filières des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL), ou la définition des étapes à venir du projet Cigéo. Il ressort également des conclusions trois autres grands sujets transversaux ainsi que des considérations majeures du public : l'éthique, la gouvernance et la confiance. Le travail préalable sur les controverses techniques mené en amont du débat avec l'ensemble des parties prenantes (producteurs, associations, Andra, IRSN...) aura permis de mieux cerner ce qui relevait de considérations techniques ou éthiques. La participation de l'Andra à ce débat a couvert l'ensemble des compétences de l'Agence ; il a notamment permis d'exposer les résultats de ses travaux scientifiques et techniques sur l'ensemble des filières de gestion des déchets et de donner des orientations aux travaux futurs. L'ASN et le Gouvernement en ont tiré les enseignements le 21 février 2020 ;
- en 2018, l'ASN a rendu son avis sur le dossier d'options de sûreté du projet Cigéo remis en 2016 par l'Andra, en vue du dépôt de la demande d'autorisation de création à l'horizon 2020-2021. Cet avis fait suite au processus d'instruction du dossier par l'IRSN, à une revue internationale des pairs par l'AIEA, à un avis du groupe permanent « déchets » et à une analyse par la Commission nationale d'évaluation. L'ASN a souligné la maturité technologique du projet et la qualité du dossier. Des éléments complémentaires devront être apportés pour la demande d'autorisation de création de Cigéo, mais cet avis permet à l'Andra de stabiliser ses grandes orientations en matière de sûreté. Les travaux scientifiques et techniques se poursuivent donc et le rapport d'activités 2018-2019 témoigne de leur forte activité en support à la demande d'autorisation de création de Cigéo.

Enfin, au-delà du projet Cigéo, l'Andra aura aussi poursuivi activement en 2018-2019 ses travaux scientifiques pour les centres de surface et le projet de stockage de déchets de faible et moyenne activité à vie longue.

**Pierre-Marie ABADIE**  
Directeur général de l'Andra

▶ 01

LES ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES  
AU SERVICE DES PROJETS ET DES ACTIVITÉS  
OPÉRATIONNELLES DE L'ANDRA

—  
P. 08

SOMMAIRE

▶ 02

L'ANDRA ET LA  
COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE

—  
P. 44



03

LA GOUVERNANCE SCIENTIFIQUE  
ET TECHNIQUE DE L'ANDRA

—  
P. 54

# MAIRIE

04

L'ANDRA ET LE PUBLIC

—  
P. 56

05

ANNEXES

—  
P. 59



# JANVIER

2019

- ▶ Signature de l'accord de collaboration scientifique Andra/IGN
- ▶ Nomination de Patrick Landais comme Haut-Commissaire à l'énergie atomique

# FÉVRIER

2019

- ▶ Manifestation « Forages profonds en France : 30 ans de résultats »

# MARS

2018

- ▶ Signature de la feuille de route Andra/ université de Lorraine
- ▶ 1<sup>re</sup> réunion du Comité technique souterrain (CTS) et nomination de Michel Deffayet (directeur du CETU et président de l'AFTES) à sa présidence

2019

- ▶ Campagne de prises de vues au Laboratoire souterrain pour visualisation 3D
- ▶ Sélection du programme EURAD par la Commission européenne

# ▶ ▶ ▶ TEMPS FORTS DE

# JUILLET

2019

- ▶ Premiers tests pour SAM (système d'auscultation mobile)
- ▶ Accord de partenariat Andra/CEA et R&D d'EDF

# SEPTEMBRE

2018

- ▶ Dépôt du dossier European Joint Programme on Radioactive Waste (EURAD)
- ▶ L'Andra réunit ses partenaires scientifiques
- ▶ Participation de l'Andra au Side Event de la 62<sup>e</sup> Conférence générale de l'AIEA, dédié à la transformation numérique du nucléaire français

# OCTOBRE

2018

- ▶ Participation de l'Andra à la campagne de prélèvement d'échantillons sur le site de Fukushima (projet ANR AMORAD)

2019

- ▶ Journée de présentation et d'échanges sur Innovation et déchets radioactifs de démantèlement

# AVRIL

## 2018

- ▶ Nomination d'Yvan Lagadeuc et Cécile Ferry au Conseil scientifique de l'Andra
- ▶ Signature de l'accord de collaboration Andra/RTE
- ▶ Organisation du 5<sup>e</sup> Workshop du projet international DECOVALEX
- ▶ Conférence internationale du projet européen Modern2020 sur le monitoring, piloté par l'Andra

## 2019

- ▶ Conférence finale du projet européen Modern2020

# MAI

## 2018

- ▶ Signature de l'accord de collaboration Andra/IFPEN
- ▶ Renouvellement de l'accord Andra/Inria

## 2019

- ▶ Démarrage des travaux du chantier 4 au Laboratoire souterrain
- ▶ Signature du renouvellement du partenariat Andra/université de Lorraine
- ▶ Journée thématique « Matériaux innovants pour les stockages »
- ▶ 2<sup>e</sup> Assemblée générale du projet européen CHANCE

# JUIN

## 2018

- ▶ Signature de l'accord tripartite Andra/Ondraf-Niras/RWM du consortium « ThermoChimie »

## 2019

- ▶ Lancement de l'expérimentation CRQ
- ▶ Creusement d'un alvéole HA descendant
- ▶ Intervention de l'Andra aux conférences FISA'19 et EURADWASTE'19
- ▶ Lancement de la programmation conjointe EURAD

# LA R&D 2018-2019

# NOVEMBRE

## 2018

- ▶ Renouvellement de l'accord de partenariat Andra/INERIS
- ▶ Renouvellement de l'accord de partenariat Andra/BRGM
- ▶ Mission scientifique d'une technicienne de l'Andra à Fukushima

## 2019

- ▶ Accord de coopération Andra/No Rao
- ▶ 7<sup>e</sup> Long-term prediction of corrosion damage in nuclear waste systems (LTC)


# DÉCEMBRE

## 2018

- ▶ Adhésion de l'Andra au CLORA, le Club des organismes de recherche français
- ▶ Labellisation de l'Andra « Talents INPI »

## 2019

- ▶ Fin de la 1<sup>re</sup> phase de l'expérimentation CRQ



# 01 LES ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES AU SERVICE DES PROJETS ET DES ACTIVITÉS OPÉRATIONNELLES DE L'ANDRA

## LES ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES DE L'ANDRA AU SERVICE DU DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL DU PROJET CIGÉO

Les travaux de R&D se sont poursuivis en support au dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de Cigéo : consolidation des modèles existants de comportement des composants, intégration des données, maquette numérique et démonstrateurs technologiques. Cette tendance s'est renforcée en 2019, avec le soutien à l'étude d'impact du dossier de déclaration d'utilité publique (DUP), en préalable à la demande d'autorisation de création de Cigéo.

### LE MILIEU GÉOLOGIQUE

#### Perfectionnement du modèle géométrique de la formation argileuse hôte, le Callovo-Oxfordien, sur la zone d'implantation du projet Cigéo

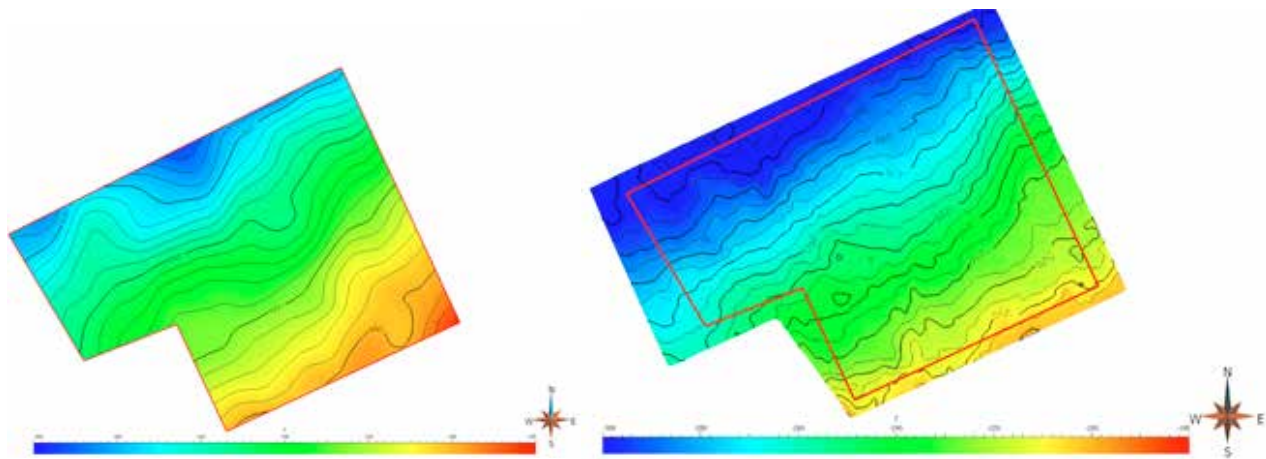
Un retraitement du bloc sismique 3D a été réalisé, en 2018, sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) qui doit accueillir l'installation fond du projet Cigéo. Objectif : améliorer l'image structurale en temps du Callovo-Oxfordien (COx).



Photographie de la vérification d'une expérimentation au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

À l'issue des études de traitement et d'interprétation des données sismiques acquises en 2010 sur la ZIRA, des ondulations de grande longueur d'onde et de faible amplitude ont été constatées au nord de la ZIRA sur les horizons interprétés en temps et convertis en profondeur dans toute la pile sédimentaire, y compris dans le Callovo-Oxfordien argileux. À l'aplomb de ces ondulations et à la résolution des données sismiques, aucune conséquence sur l'épaisseur de la couche et de ses propriétés n'a été observée. Les horizons sismiques ont montré dans le Callovo-Oxfordien un pendage d'environ  $1,5^\circ$  vers le nord-ouest, conforme aux observations relevées dans la couche au niveau des galeries du Laboratoire souterrain. Pour l'Andra, l'origine de ces ondulations était liée au traitement des données sismiques, et plus spécialement à l'étape des correc-





Cartes en profondeur de la base du Callovo-Oxfordien : à gauche, les données sismiques obtenues en 2011 ; à droite, les données sismiques obtenues en 2018 après amélioration du retraitement

tions statiques. Cette étape importante permet de s'affranchir des variations des vitesses des couches superficielles qui dépendent de la géologie, de la topographie, de l'hydrogéologie et de l'altération.

Avec les progrès notoires des méthodes de traitement et des connaissances accrues du milieu géologique en surface, l'Andra a repris pas à pas le traitement des données sismiques disponibles. Une modélisation géologique des 20 premiers mètres de formation a été réalisée. Les mesures de vitesses enregistrées dans des forages courts de 30 à 50 m de profondeur (carottages VT), mais également les vitesses issues des profils de sismique réfraction (données LVL) ont été intégrées au modèle. Les temps sismiques ont pu être calibrés en tout point de la zone d'étude.

Après cette phase de traitement des corrections statiques et des statiques résiduelles, toutes les étapes suivantes du traitement ont été reprises et le bloc sismique 3D en temps a été reconstruit. La réalisation du pointé sismique en temps de

tous les horizons a permis de visualiser la structure 2D de ces horizons, conduisant à une amélioration notable de la qualité de l'image sismique obtenue sur toute la pile sédimentaire et sur toute l'emprise de la ZIRA.

Suite à ce nouveau traitement, les cartes temps des différentes surfaces remarquables du Callovo-Oxfordien montrent une réduction, voire localement une suppression, des ondulations de grande longueur d'onde et de faible amplitude observées. Elles permettent aussi de confirmer encore plus nettement le faible pendage de la formation du Callovo-Oxfordien vers le nord-ouest et sa régularité.

### **Poursuite des travaux de caractérisation géologique des calcaires du Barrois**

Témoignage  
Sylvain  
GIGLEUX

#### **Apport de la télédétection à l'analyse de l'extension du réseau de fracturation des Calcaires du Barrois**

Les installations de surface de Cigéo seront implantées sur la formation géologique des Calcaires du Barrois, qui comporte un aquifère superficiel fracturé et karstifié multicouche.



## Sylvain GIGLEUX

Hydrogéologue, Service Transferts, Direction de la Recherche et Développement

Le modèle actuel de représentation géologique et hydrogéologique du système aquifère des calcaires du Barrois (aquifère karstique) est établi à l'échelle du secteur Meuse/Haute-Marne. Aujourd'hui, afin d'accompagner le développement du projet Cigéo vers sa phase industrielle, il est nécessaire de consolider la connaissance scientifique du fonctionnement de l'aquifère du Barrois pour disposer d'un modèle hydrogéologique à différentes échelles spatiales et temporelles cohérentes avec le dimensionnement et la surveillance des installations de surface (descenderies, bâtiment EP1, ITE, LIS, ...). Les enjeux majeurs en termes de modélisation des systèmes karstiques reposent sur :

- la capacité à représenter un système complexe prenant en compte de façon explicite les interactions entre les eaux de surface (système hydrologique) et les eaux souterraines ;
- la définition d'échelles spatiales cohérentes avec les phénomènes à prendre en compte (milieux poreux équivalent,

double voire triple porosité) ;

- l'intégration des données nouvellement acquises dans des codes de calculs adaptés.

Afin de répondre à ces enjeux, nous avons établi un premier programme scientifique de caractérisation pour les cinq prochaines années afin de fournir une représentation conceptuelle du fonctionnement de l'aquifère du Barrois qui servira de données d'entrée à l'établissement et au perfectionnement des modèles numériques hydrogéologiques. Quatre grands axes seront abordés au cours de ce programme concernant la géologie, l'hydrogéologie, la géochimie et la modélisation.

Plusieurs partenaires scientifiques de l'Andra seront mobilisés dans les mois et années à venir pour la réalisation des études de caractérisation, de conceptualisation et de simulations numériques.

La gestion de l'eau, tant en termes de conception des installations de surface que d'évaluation des incidences environnementales, nécessite de représenter les écoulements au sein de cette formation. Le suivi hydrogéologique déjà mené depuis plusieurs années (mesures piézométriques, forages, etc.) a permis d'appréhender son fonctionnement global et montré le rôle prépondérant de la fracturation et des drains horizontaux sur les directions d'écoulement. La variabilité des observations indique que celles-ci concernent une vision locale de la représentation de la fracturation. Pour étendre le modèle de la fracturation à une échelle plus large, l'analyse du suivi hydrogéologique a été complétée par l'interprétation de 2 sources de données aéroportées :

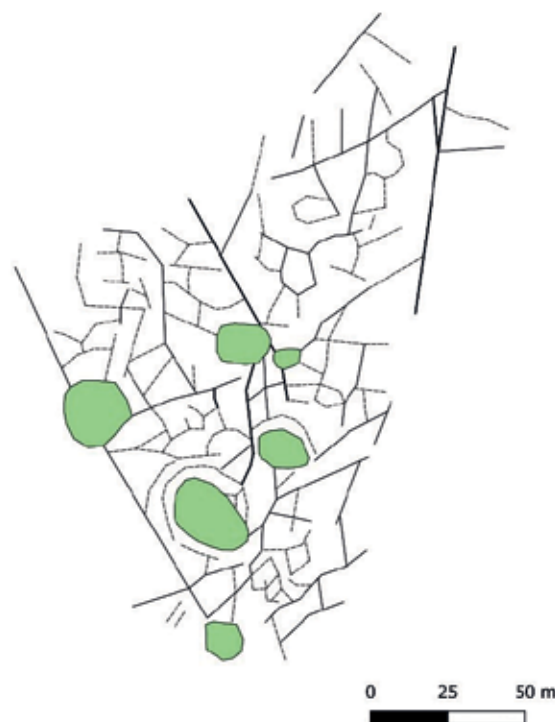
- des données lidar produisant des modèles numériques de terrain (MNT) donnant l'altitude de la surface du sol avec une précision altimétrique de l'ordre du décimètre au centimètre. Traitées selon 2 méthodes complémentaires (traitement informatique et simulation des ombres produites par le relief modélisé par le MNT), elles ont permis de localiser les structures karstiques telles que les dolines, qui se manifestent par des dépressions le plus souvent circulaires ;
- des photographies aériennes des 15 dernières années prises à différentes saisons, complétées localement par des photos plus anciennes (1945 à 1970) pour vérifier que les traces observées n'étaient pas anthropiques. L'étude de l'état de la végétation et de la couleur du sol, qui sont des

indicateurs de la nature géologique du substrat sur lesquels ils se développent, a permis de révéler et de localiser les structures karstiques et les fractures de surface.

L'étude de ces données aéroportées a permis de produire une carte de la fracturation et des structures karstiques sur une large partie de la zone d'implantation des installations de surface du projet Cigéo, apportant des informations sur la densité de la fracturation et des structures karstiques. Les directions principales des fractures mises en évidence sont en cohérence avec celles mesurées localement en forage ou sur affleurements. Ces données, associées à une étude de terrain en 2020, permettront de compléter les modèles conceptuels de la fracturation des Calcaires du Barrois et du fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère des Calcaires du Barrois.

#### **Consolidation du modèle 3D de la formation des calcaires du Barrois via la campagne géotechnique sur l'ITE**

La campagne de forages relative à la mission de reconnaissance géologique, géotechnique et hydrogéologique pour la création de la future Installation terminale embranchée (ITE) a été l'opportunité d'obtenir de nouvelles données qui serviront à consolider et alimenter le modèle géométrique des Calcaires du Barrois. D'octobre à décembre 2019, 28 forages carottés ont été réalisés de façon répartie sur les 15 km environ que mesure l'ITE, reliant la Zone Descenderie au terminal fret de Gondrecourt-le-Château.



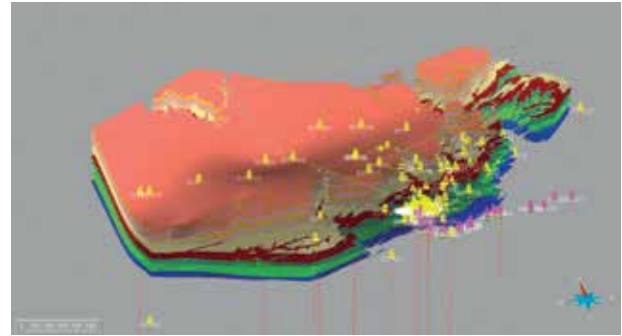
Exemple d'un réseau dense de fractures associées à des dolines révélé par des différences de développement des plantes dans un champ cultivé. Les dolines apparaissent sous la forme de taches denses (pointées en vert sur l'interprétation) et les fractures sous la forme de segments plus ou moins continus (en noir sur l'interprétation) (images satellites : données MapBox)

Les différentes directions de l'Andra (Ingénierie, Centre de Meuse/Haute-Marne et R&D) ont collaboré pour le succès de cette campagne depuis sa planification jusqu'à la coordination des différents prestataires et de la sécurité. La société Fugro France a été mandatée pour réaliser des diagraphies sur 19 de ces forages. Ces diagraphies (mesures de la radioactivité naturelle, diamètre et caméra optique) permettent de pointer les limites des formations géologiques traversées, et de caractériser la fracturation et l'altération depuis la surface, ainsi que leur quantification. En complément à ces mesures diagraphiques, les carottes de 14 de ces forages ont fait l'objet d'une description lithologique fine.

Le modèle géologique de la géométrie des Calcaires du Barrois, construit depuis 2012 et régulièrement alimenté en nouvelles données, est aujourd'hui calé à plus d'une centaine de forages. Ces nouveaux forages réalisés en 2019 affinent le modèle géologique au niveau de la Zone Descenderie, en apportant de nouvelles données sur le Kimméridgien marneux et sur la partie sommitale de l'Oxfordien et en étendant le modèle vers l'ouest au-delà du fossé de Gondrecourt-le-Château.



Photographie de la réalisation du forage CIG1344 sur la zone ITE



Vue d'ensemble du modèle géologique géométrique de la formation des calcaires du Barrois à l'échelle régionale (échelle verticale x 30), en violet : les forages le long de l'ITE

## Les modélisations à grande échelle

### Actualisation du modèle hydrogéologique sur le prochain million d'années

Le modèle hydrogéologique à l'actuel et son évolution sur le prochain million d'années ont fait l'objet d'actualisations et de consolidations, se fondant notamment sur les nouveaux éléments suivants : (i) une intégration des données de la sismique 3D et la correction de la géométrie du système multicouche à l'aplomb de la ZIRA ; (ii) une précision de la géométrie du Kimméridgien marneux ; (iii) un ajustement des géométries des horizons poreux (Hp) de l'Oxfordien (4 couches au lieu de 3 dans le précédent modèle) et des couches de marnes de la série grise (3 couches au lieu de 2 dans le précédent modèle) avec des épaisseurs variables ; (iv) l'intégration d'un réseau karstique dans l'Oxfordien au droit de la zone de fracturation diffuse ; et (v) un scénario d'évolution géodynamique maximaliste, combinant une surrection tectonique maximaliste en équilibre avec l'érosion dans les vallées.

Les résultats font apparaître des affleurements de l'Oxfordien (Ornain) vers 400 000 ans à 10 km au nord de la ZIRA, mais dont l'influence est faible sur le million d'années du fait de longs temps de transfert dans l'aquifère et des séries grises qui limitent le rôle hydraulique de drain par les affleurements. Les vitesses moyennes d'écoulement associées aux voies de transfert sont estimées pour une évolution naturelle du climat

Témoignage  
Frédéric  
EGO



## Frédéric EGO

Sismotectonicien, Service Coordination opérationnelle, Caractérisation et Chaînes de données, Direction de la Recherche et Développement

Le site géologique du projet Cigéo évoluera naturellement sur le prochain million d'années du fait combiné de l'évolution géodynamique interne du Bassin parisien, contrôlée par la tectonique des plaques, et de l'évolution géodynamique externe, gouvernée par le climat. L'évaluation des effets éventuels de cette évolution sur les caractéristiques de la formation argileuse hôte du projet Cigéo, et du milieu géologique en général, notamment les écoulements d'eau souterrains et les exutoires naturels (apparition ou disparition, localisation) est une donnée importante pour l'évaluation in fine du retour éventuel de radionucléides vers la biosphère.

Pour ce faire, l'Andra s'appuie sur des organismes du monde académique et de la recherche scientifique de renommée internationale [par exemple : École nationale supérieure des Mines de Paris, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA), CEREGE, université de Lorraine, Institut de physique du globe de Paris, Muséum d'histoire naturelle de Paris, BRGM, etc.].

Tous ces travaux ont conduit à l'élaboration de modèles d'érosion, de surrection tectonique, d'évolution climatique, etc., qui, traduits en termes de scénarios enveloppes, nous permettent aujourd'hui d'évaluer de manière prudente les conséquences en termes principalement d'occurrence d'exutoires naturels potentiels.

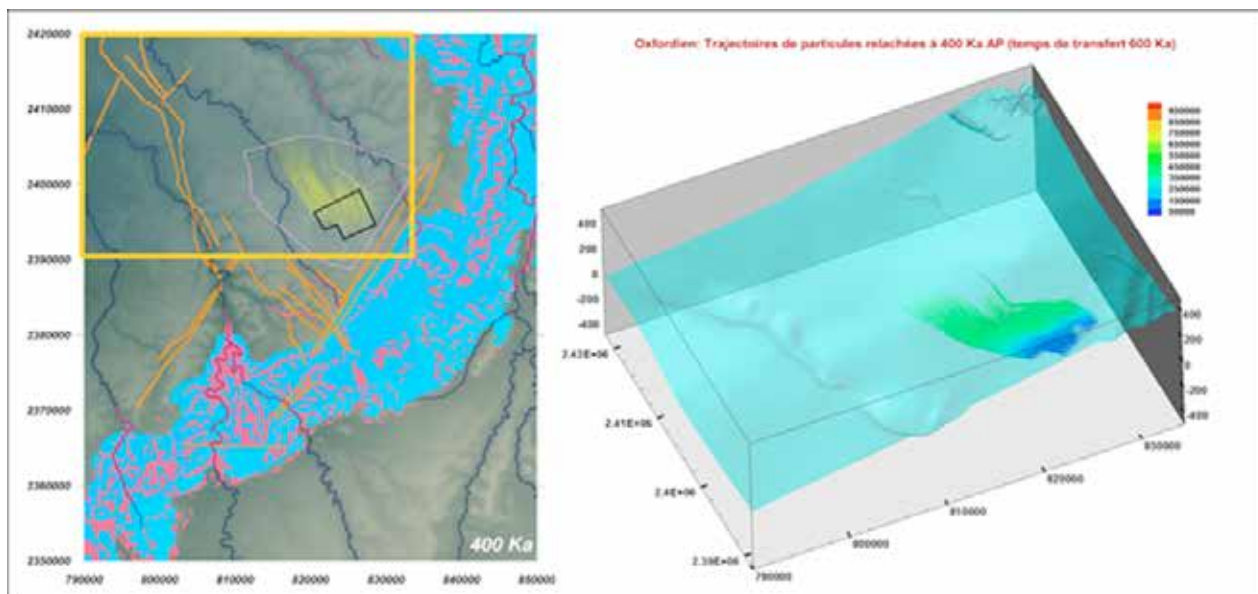


Illustration de l'effet de l'érosion de l'Oxfordien calcaire (encaissant sous-jacent de la roche hôte du Callovo-Oxfordien) sur les caractéristiques des voies de transfert dans cette formation au droit du projet Cigéo

et un scénario géodynamique maximaliste d'évolution de la surrection tectonique et de l'érosion, et sont de l'ordre de 4 km par 100 000 ans. Les trajectoires de transport convectif latéral dans l'Oxfordien et dans le Dogger restent orientées nord/nord-ouest sur le prochain million d'années.

#### **Actualisation du transitoire hydraulique gaz, en après fermeture, à l'échelle de Cigéo**

Différents déchets et constituants de Cigéo (armatures des bétons du génie civil, chemisages des alvéoles HA, etc.) sont des métaux qui, une fois le stockage fermé, produisent de l'hydrogène par corrosion en conditions anoxiques.

L'hydrogène produit étant dissous progressivement dans les eaux du Callovo-Oxfordien, une phase gaz, principalement constituée d'hydrogène, se développe au sein du stockage. La pression de gaz atteint un maximum quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'années après la fermeture de Cigéo, puis le terme source d'hydrogène diminue ensuite car la totalité du métal est corrodée et le stockage tend alors vers

un état totalement saturé à quelques centaines de milliers d'années.

Sur la base des composants et dispositions de conception de l'architecture fond, des connaissances acquises depuis plus de 20 ans sur la production et la migration des gaz dans les différents composants de Cigéo, et des progrès en simulation numérique, le domaine de pression maximale de gaz dans le stockage a été évalué de manière détaillée. Les résultats contribuent aux évaluations de sûreté après fermeture de Cigéo et à l'optimisation de la conception visant notamment à limiter la présence de métaux et/ou favoriser l'évacuation de l'hydrogène. Les évaluations menées ont montré que le domaine de pression maximale de gaz est principalement contrôlé par les vitesses de corrosion des aciers, la cinétique de migration du gaz sous forme dissoute dans le Callovo-Oxfordien ainsi que les propriétés (perméabilités au gaz, pression d'entrée de gaz, etc.) des scellements des galeries et des ouvrages d'accès (puits et descenderies).

Témoignage  
Jacques  
WENDLING



## Jacques WENDLING

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

L'Andra a mis en œuvre un processus d'évaluation du domaine de pression maximale de gaz en deux temps. Dans un premier temps, elle a fait appel à des laboratoires spécialisés qui, après intégration des modèles numériques des différents processus physiques se produisant à l'échelle de Cigéo, ont établi une simulation de référence du transitoire hydraulique-gaz ainsi que des simulations de sensibilité pour estimer les bornes des indicateurs, notamment la pression maximale de gaz dans le stockage.

Dans un second temps, les ingénieurs modélisateurs de l'Andra ont complété ces simulations déterministes par une analyse de

sensibilité statistique pour couvrir l'ensemble des variabilités et incertitudes résiduelles sur les paramètres et ainsi déterminer un domaine plausible de pression maximale de gaz dans le stockage, permettant notamment de s'assurer de la préservation des propriétés des composants du stockage en après fermeture. Il s'agit d'une approche originale qui met en jeu un nombre élevé de simulations numériques, rendu possible par les progrès des codes et machines de calcul. Cela permet également d'identifier les paramètres les plus influents et d'orienter la conception.

## LE CREUSEMENT, LA COMPRÉHENSION DU COMPORTEMENT À LONG TERME ET LE MONITORING DES ALVÉOLES DE DÉCHETS HA

Témoignages  
Frédéric  
BUMBIELER  
Xavier  
BOURBON

### De nouveaux démonstrateurs d'alvéoles de déchets HA dans le Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne

Cinq démonstrateurs d'alvéole HA ont été réalisés sur la période 2018/2019, ce qui porte le linéaire cumulé réalisé depuis 2009 à 900 m.

Afin d'optimiser la faisabilité de la mise en œuvre d'un matériau cimentaire de remplissage entre l'extrados du chemisage en acier et le Callovo-Oxfordien, 3 démonstrateurs d'alvéole de déchets HA ont été réalisés au Laboratoire souterrain en 2018. Suite au retour d'expérience de la campagne précédente 2016/2017, les chemisages de ces 3 alvéoles ont été équipés de centreurs dans le but de garantir un remplissage complet optimum du vide annulaire avec la roche par un matériau cimentaire. Les mesures géométriques et examens visuels réalisés sur un de ces alvéoles, l'alvéole AHA 1606 de 40 m de longueur, ont mis en évidence le gain apporté par cette évolution technique en termes d'homogénéité circumférentielle du remplissage.

En 2019, un premier démonstrateur d'alvéole de 80 m de longueur (longueur d'un alvéole dans le quartier pilote HA), très instrumenté en dispositifs de surveillance a été réalisé (démonstrateur AHA1605). L'instrumentation complète mise en place permet le suivi du comportement thermo-mécanique du chemisage, de son endommagement progressif par corrosion et de l'environnement géochimique de l'extrados. Enfin un premier démonstrateur de 40 m de longueur avec une pente de -10 % (démonstrateur d'alvéole AHD1601) a été réalisé avec succès en juin 2019 sans variation sensible des paramètres de creusement et de fonçage. Ce démonstrateur entre dans le cadre des travaux en cours sur l'optimisation de la conception de l'alvéole HA, en particulier dans le but d'améliorer leur caractère passif en exploitation.



Xavier  
BOURBON

Ingénieur matériaux  
cimentaires, Service Colis  
et Matériaux, Direction de la  
Recherche et Développement

Le matériau de remplissage de l'espace annulaire de l'alvéole de déchets HA, dont les grands principes de formulation ont fait l'objet d'un brevet en 2015, a été mis en œuvre à l'échelle 1:1 dans différentes expérimentations in situ au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Plusieurs essais de préparation en conditions « fond », puis d'injection ont été conduits avec succès, jusqu'à des volumes injectés de plusieurs dizaines de mètres cubes. En parallèle, les travaux de R&D ont été poursuivis en laboratoires « jour » suivant deux axes. Le premier vise la caractérisation des propriétés intrinsèques de ce premier matériau de remplissage sur une plage de conditions cohérentes avec celles prévues en situation de stockage : hygrométrie, température, contrainte mécanique. Le second concerne le domaine de gammes de formulations possibles pour disposer d'une large palette de solutions. Plusieurs caractéristiques chimiques (alcalinité) et physiques (compacité) ont été couvertes, tout en gardant la capacité d'injection du matériau et le caractère inerte de ce matériau, une fois chimiquement neutralisé, vis-à-vis des déchets vitrifiés. En parallèle, intégrant ces variations de compositions, des simulations numériques ont été réalisées pour évaluer le comportement chimique à long terme. La capacité du matériau à neutraliser le Callovo-Oxfordien oxydé en champ proche a été démontrée expérimentalement et vérifiée par simulation, pour différentes situations de stockage. Ceci valide ainsi le domaine de formulations développées vis-à-vis des spécifications chimiques. Enfin, en parallèle, des essais, en laboratoire « jour » et in situ, sur les effets de la présence du matériau sur la corrosion des aciers du chemisage et du conteneur de stockage, ont été mis en place. Il s'agit de préciser, pour la gamme des formulations possibles, les cinétiques de corrosion en fonction des conditions d'environnements successifs attendus dans le stockage : présence ou pas d'eau, d'oxygène, température... Cet ensemble de données fourni aujourd'hui une vision suffisamment large pour pouvoir s'adapter aux exigences relatives à l'alvéole HA.



Frédéric BUMBIELER

Ingénieur structure, Service Mécanique des Fluides et des Solides,  
Direction de la Recherche et Développement

La campagne de creusement de démonstrateurs d'alvéole de déchets HA réalisée en 2018/2019 a permis de confirmer la robustesse de la technologie développée en 2016, aussi bien en termes d'excavation que de fonçage du chemisage ou encore de cimentation du vide annulaire entre le chemisage et la roche. La maîtrise de cette cimentation a été sensiblement accrue par la mise en place de centreurs sur chaque chemise, ce qui garantit une meilleure homogénéité géométrique du remplissage. La période 2018/2019 a également vu se poursuivre les travaux sur l'instrumentation non intrusive du chemisage. Plusieurs fibres optiques permettant une mesure répartie de déformation et de température ont ainsi été posées lors du fonçage du chemisage

d'un alvéole de 25 m de longueur destiné à être sollicité thermiquement dès 2020. Cette instrumentation, fonctionnelle à 100 % en fin d'installation, fournira des données de caractérisation 3D du comportement thermo-mécanique du chemisage en phase de chauffe, notamment des mesures indirectes de convergence en zone chauffée et des profils longitudinaux de température. Le démonstrateur très instrumenté en dispositifs de surveillance sur 80 m présente un taux de fonctionnement des capteurs après finalisation de l'alvéole proche de 100 %, ce qui valide la capacité à les installer sans contraintes opérationnelles majeures, notamment vis-à-vis du temps de pose qui aurait pu s'avérer rédhibitoire notamment pour la stabilité des parois du forage.



Photographie d'une chemise équipée de centreurs utilisée pour les démonstrateurs d'alvéole de déchets HA réalisés en 2018 dans le Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne

Une particularité de la campagne expérimentale 2018/2019 a été la construction d'un alvéole HA de 70 m de longueur en front de galerie GRD5 (alvéole AHA4001) destiné à être sur-excavé lors du creusement de la galerie GRD6 en 2020. L'objectif est de quantifier, à chaque pas de sur-excavation, l'hétérogénéité géométrique du remplissage et d'évaluer la capacité du matériau de remplissage cimentaire, qui a été coloré pour augmenter le contraste avec le Callovo-Oxfordien, à pénétrer les fractures de la zone endommagée en périphérie proche de l'ouvrage.

Enfin, l'alvéole ALC1605 de 25 m de longueur a été équipé en 2019 d'une sonde chauffante en vue d'évaluer, en configuration proche d'un alvéole HA réel, l'effet du dégagement de chaleur sur (i) le comportement thermo-mécanique du chemisage et (ii) le comportement thermo-hydro-mécanique du Callovo-Oxfordien en champs proche et lointain. Une comparaison avec le précédent essai de chauffe échelle 1:1 (alvéole ALC1604, en 2013) doit permettre de mettre en évidence le rôle éventuel de la présence du matériau cimentaire en extrados du chemisage. Cette expérimentation a également été mise à profit pour

poursuivre les développements technologiques de faisabilité de la pose d'une instrumentation non intrusive du chemisage pendant la phase d'exploitation réversible de l'alvéole : il s'agit essentiellement d'une instrumentation de l'extrados du chemisage en fibres optiques, permettant de suivre en continu et de manière répartie l'évolution de sa température et de sa déformation, aussi bien dans la direction axiale que celle orthoradiale. Ces mesures innovantes sont systématiquement couplées à des mesures traditionnelles de déformation et de température en face interne.

### **Échanges de gaz entre un alvéole de déchets HA et sa galerie, durant la période d'exploitation**

Depuis 10 ans, des démonstrateurs d'alvéoles HA dans le Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne sont instrumentés pour étudier les échanges de gaz ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ) entre ces alvéoles et la galerie adjacente. En pratique, ces alvéoles sont fermés en tête sans disposition particulière en termes de spécification d'étanchéité au gaz, et une dizaine de fenêtres rondes de 10 cm de diamètre sont ouvertes à travers

Témoignage de  
Agnès  
VINSOT



**Agnès VINSOT**

Ingénieure géochimiste, Service Transferts,  
Direction de la Recherche et Développement

Les dispositifs de suivi de la composition des gaz au sein de démonstrateurs d'alvéole de déchets HA dans le Laboratoire souterrain résultent de 15 ans de développement de systèmes continus de suivi des gaz en forage. Nous utilisons des appareils de mesure de laboratoire tels que les micro-chromatographes en phase gazeuse combinés à des systèmes de circulation très étanches et adaptés aux conditions du fond. Ce qui est original,

c'est de mener ce type de suivis sur des périodes de plusieurs mois à plusieurs années. En plus des appareils bien adaptés à ce qu'on souhaite mesurer, il y a deux ingrédients essentiels pour réaliser des mesures dans le Laboratoire souterrain : tenir compte des conditions du terrain à l'endroit où on veut placer un capteur localement et évaluer la perturbation amenée par le dispositif de mesure lui-même.

le chemisage à différentes distances de la galerie. Les concentrations des gaz contenus dans l'alvéole sont mesurées grâce à des tubulures placées dans le chemisage qui effectuent le prélèvement et l'amènent soit vers des dispositifs de mesure en ligne de sa composition, soit vers des tubes de prélèvements pour des analyses plus poussées en laboratoire « jour ». En 2018, un test à l'azote a été mené : après remplissage d'un démonstrateur d'alvéole HA avec de l'azote, les mesures ont mis en évidence l'apparition d'oxygène et une accumulation à chaque montée de la pression atmosphérique, montrant que l'air de la galerie pouvait entrer dans les alvéoles.

Ces résultats ont démontré que, dans les configurations testées, l'air pouvait circuler entre la galerie et l'extérieur de l'alvéole HA en fonction des variations de pression dans la galerie. De nouvelles mesures sont en cours pour identifier les voies de transfert de l'air depuis la galerie et le rôle du Callovo-Oxfordien endommagé mécaniquement en pourtour des galeries et des alvéoles. Elles permettront de configurer les futurs démonstrateurs d'alvéoles dédiés à l'étude des échanges de gaz entre galerie et alvéole HA, notamment en termes de spécification de limitation des échanges gazeux.

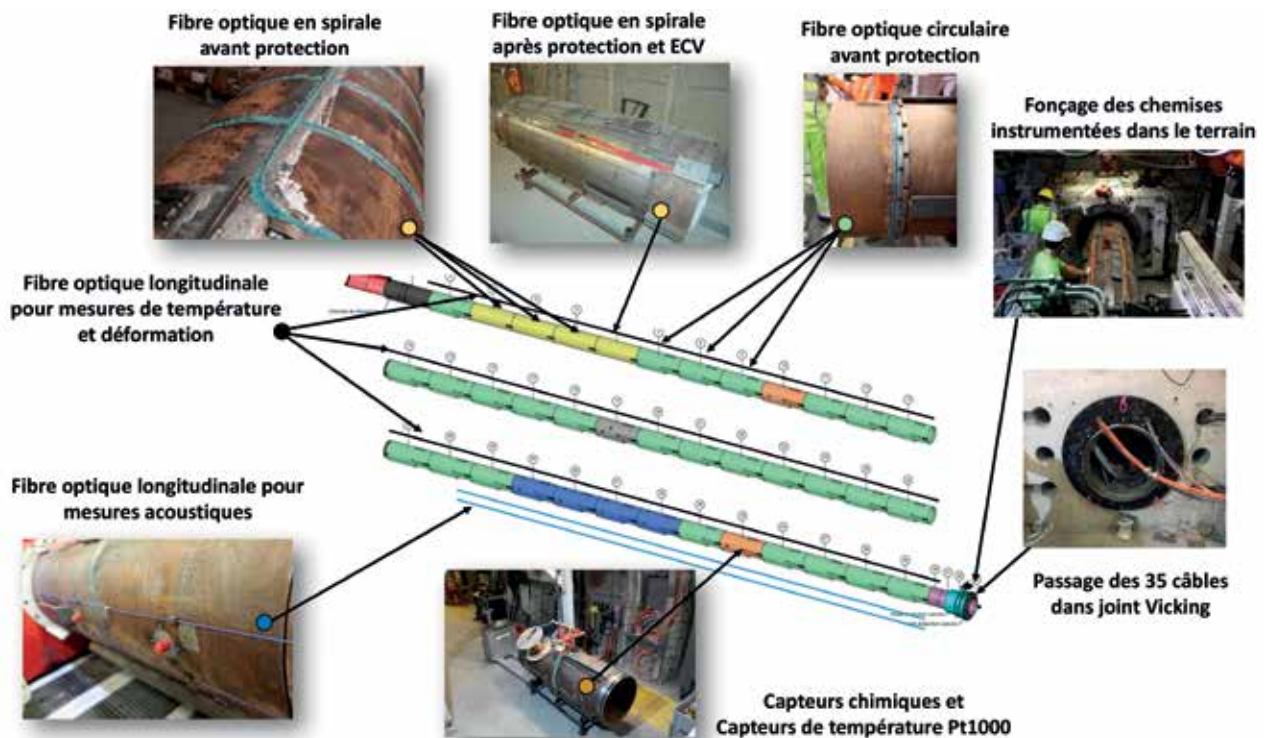
**Faisabilité de mise en œuvre d'un dispositif de monitoring d'un alvéole HA**

Face aux besoins spécifiques du monitoring des stockages, l'Andra mène depuis plus de 10 ans un programme d'études visant à démontrer la capacité de mesure, la durabilité et la fiabilité des instruments de mesure, et à initier la qualification et la certification de technologies. Les travaux dans le domaine

de l'instrumentation en milieux confinés nécessitent de faire cohabiter des technologies très différentes et de travailler sur toute la chaîne de mesure (instrument, câble, capteur) pour minimiser l'encombrement, éviter des interférences entre capteurs, maximiser la durée de vie du capteur, etc.

L'objectif du démonstrateur expérimental AHA1605, réalisé au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne en 2019, est de démontrer la faisabilité d'un dispositif de monitoring (mise en œuvre et suivi) représentatif du quartier pilote HA. Les paramètres visés, identifiés pour répondre aux besoins de surveillance en lien avec la récupérabilité des colis et la sûreté après fermeture, peuvent être regroupés selon deux catégories de besoins :

- contrôler la conformité de l'ouvrage avec le cahier des charges initial lors de la réception après creusement. Pour cela, plusieurs dispositifs de mesure sont utilisés afin de vérifier la géométrie (rectitude et pente) de l'ouvrage, la qualité du remplissage par le matériau cimentaire à l'extrados du chemisage et la qualité des emboîtements entre les chemises, et évaluer l'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien au pourtour proche de l'alvéole ;
- tester et qualifier des dispositifs de mesures pour le suivi de l'atmosphère de l'alvéole, de l'évolution du chemisage et du champ proche de l'ouvrage (roche) : mesures de concentration de gaz (vapeur d'eau, hydrogène et oxygène), de pression interstitielle dans la roche, de champ thermique et de contraintes du chemisage, quantité et composition chimique des éventuelles eaux collectées, etc.



Vues de l'instrumentation et du fonçage du démonstrateur d'alvéole HA AHA1605

Pour extrapoler les mesures locales sur l'ensemble de l'alvéole, l'instrumentation de AHA1605 est constituée :

- de deux systèmes de mesures de déformation orthoradiale par fibre optique collée sur chaque chemise avant le fonçage (cinq spires espacées de 25 cm ou sous forme d'une double boucle) ;
- de câbles sensibles à fibre optique sur une génératrice permettant :
  - d'une part, la mesure des déformations axiales et de la température sur toute la longueur de l'alvéole,
  - d'autre part, les mesures acoustiques sur 28 m ;
- d'une section de mesure des déformations par corde vibrante ;
- de capteurs de température PT1000 installés sur 2 chemises ;
- de capteurs chimiques installés sur trois chemises pour des mesures de gaz ( $O_2$  et  $H_2$ ). La corrosion sera également étudiée via différentes technologies de capteurs (capteur résistif et sondes électrochimiques) et des prélèvements de coupons de corrosion.

L'objectif étant de qualifier les technologies retenues, il est prévu de confronter les mesures réalisées à l'extrados par des mesures en redondance avec des systèmes de mesures déjà éprouvés et validés disposés à l'intérieur de l'alvéole.

La réalisation de l'alvéole AHA1605 a permis de démontrer que l'installation selon différents principes, modes de pose et systèmes de connexion des fibres optiques et de l'ensemble des capteurs, est maîtrisée ainsi que la gestion des 35 câbles sur les 75 m instrumentés. L'exploitation des données en cours d'acquisition permettra, dans les prochains mois, de conclure sur les performances des technologies retenues et de comparer les différentes configurations de mesure avec les capteurs classiques notamment.

Témoignage  
Pierre  
ROBIN

#### Essais de faisabilité d'un alvéole HA descendant

Afin de démontrer la faisabilité de creusement d'un alvéole descendant et de mesurer si les conditions d'ovalisation du chemisage sont affectées par la pente, le démonstrateur d'alvéole HA, AHD1601, a été creusé en juin 2019 dans la galerie GAN, à une pente descendante de 10 %.

#### Expérimentation CRQ de chauffe de la formation hôte du Callovo-Oxfordien

L'objectif de l'expérimentation CRQ « Comportement représentatif d'un quartier HA », mise en œuvre dans la galerie GCS du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, est de reproduire, sur un temps court, un chemin de contrainte effective, de pression interstitielle et de température similaire à celui que l'on observerait à l'entraxe entre deux alvéoles dans un quartier HA, afin de préciser les marges liées au dimensionnement thermo-hydro-mécanique des quartiers HA retenu pour le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo.

La configuration périodique des quartiers HA, constitués d'un grand nombre d'alvéoles parallèles, implique que la zone située au demi-entraxe des alvéoles est chargée par les deux alvéoles adjacents. Dans cette zone, l'augmentation transitoire de la température induira une augmentation transitoire de la pression interstitielle alors que les conditions de symétrie latérales empêchent la dilatation horizontale du milieu et la dissipation horizontale des pressions interstitielles, provoquant une évolution anisotrope des contraintes : augmentation de la compression suivant la direction horizontale et dilatation verticale « libre » dans la direction verticale. Cette situation engendre une augmentation transitoire de la contrainte effective verticale pouvant conduire à des contraintes effectives en traction. Le dimensionnement THM des quartiers HA est effectué pour éviter que cela conduise à un endommagement du Callovo-Oxfordien (c'est-à-dire une fracturation). L'expérimentation CRQ « Comportement représentatif d'un quartier HA » a été dimensionnée pour reproduire ce type de chemin de contrainte sur un temps court, alors qu'il faut quelques centaines d'années pour atteindre le maximum de contrainte effective dans les quartiers HA, puis si possible poursuivre le chargement pour atteindre la fracturation.

Quatre forages de mesure des pressions interstitielles et de température ont été réalisés et équipés fin 2017 pour permettre la remontée des pressions vers la pression hydrostatique avant le démarrage de l'essai. Les autres forages (10 forages chauffants et 4 forages acoustiques) ont été réalisés autour de la zone où est attendu l'endommagement et équipés entre le septembre 2018 et mars 2019.



**Pierre ROBIN**

Expert forage, Direction de l'Ingénierie

Pour cette opération de creusement d'un démonstrateur d'alvéole HA descendant, quelques modifications ont été apportées à la machine de Bessac que nous utilisons actuellement pour les alvéoles montants à 2 %. Les résultats ont été satisfaisants en ce qui concerne le creusement, le retrait du microtunnelier, le fonçage des éléments de chemisage et l'injection du matériau cimentaire en extrados du chemisage. Une déchirure d'un joint

d'étanchéité entre 2 éléments de chemisage nous a retardés de quelques heures, temps nécessaire à son remplacement. Un passage de caméra dans le chemisage et après injection du matériau cimentaire a montré des fuites et des morceaux de joints arrachés sans doute au fonçage, sans préjudice toutefois sur le volume de matériau injecté.





Photographie des sondes chauffantes de l'essai CRQ



Photographie de l'installation des sondes chauffantes de l'essai CRQ

La chauffe, régulée en température, a été lancée le 3 juin 2019. Au bout de 60 jours, la température maximale mesurée a été de 83 °C avec une pression interstitielle maximale atteinte au niveau des forages de pression au cours de l'essai de l'ordre de 16 MPa. Cette valeur correspond à une contrainte effective de Terzaghi en compression entre 1 et 2 MPa. Aucune fracturation n'a été observée par les différents moyens de mesures mis en œuvre. En effet, les mesures acoustiques acquises en continu n'ont montré aucun événement sismique, signe d'une micro/macro fissuration, supérieur au bruit de fond. De plus, les mesures de pression réalisées dans les différentes chambres de la zone centrale ont affiché des valeurs similaires les unes des autres et des cinétiques de comportements proches de celles observées dans les précédentes expérimentations de chauffe au Laboratoire souterrain, sans signe de saut de pression qui accompagnerait la dilatance de la roche liée à la fracturation.

La chauffe de CRQ a été arrêtée progressivement à partir d'août 2019. Un nouveau cycle de chauffe plus rapide ayant pour but d'atteindre des pressions interstitielles supérieures (>18 MPa) et d'atteindre la fracturation sera lancé en 2020.

#### **Inter comparaison de modèles de comportement thermo-hydro-mécanique (THM) de la formation hôte du Callovo-Oxfordien dans le cadre du dimensionnement thermique des quartiers HA**

Le dimensionnement thermique des quartiers HA doit vérifier à la fois le critère de température maximale de 100 °C dans la roche hôte et l'absence d'endommagement mécanique de cette dernière, sous le chargement THM, afin de préserver ses caractéristiques favorables (c'est-à-dire la contrainte effective de Terzaghi, maximale à l'entraxe entre 2 alvéoles, doit rester en compression et ne pas dépasser -0,5 MPa). Ce dimensionnement est mené à l'aide de simulations numériques reposant principalement sur un modèle thermo-poro-élastique du Callovo-Oxfordien. Afin d'évaluer le niveau de robustesse de cette approche, l'Andra et ses partenaires de recherche (Ineris, université polytechnique de Catalogne, LamCube) ont réalisé des simulations numériques basées sur des modèles de comportement plus complexes, à savoir thermo-poro-élasto-plastiques et thermo-poro-élasto-visco-plastique, représentant de manière plus précise le comportement du Callovo-Oxfordien.



## Carlos PLUA

Ingénieur géomécanicien, Service Mécanique des Fluides et des Solides,  
Direction de la Recherche et Développement

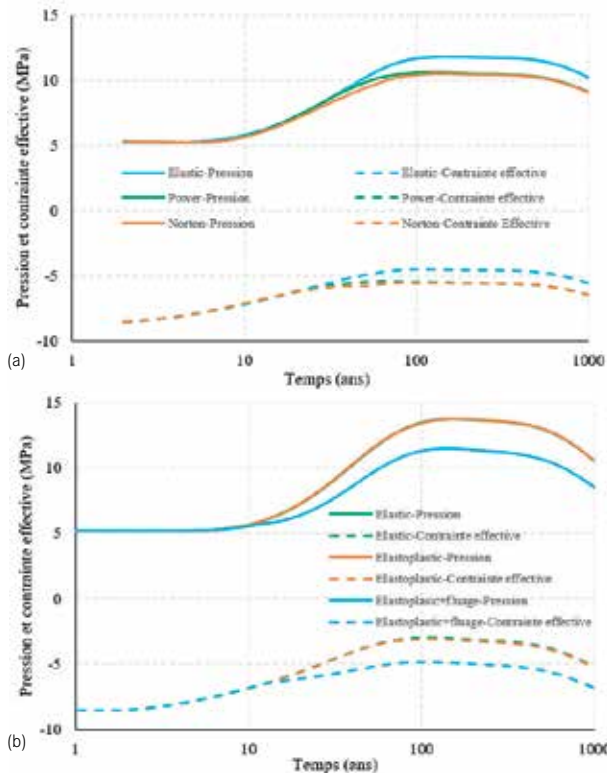
La difficulté de cette expérimentation est de pouvoir générer des pressions interstitielles très élevées tout en limitant leur dissipation par des gradients hydrauliques. Comme nous ne pouvons pas faire un « modèle réduit » exact de quartier HA dans le Laboratoire souterrain, nous avons dû trouver une configuration géométrique par modélisation numérique qui permettrait de reproduire un chemin de contrainte proche de celui qui sera suivi à l'entraxe entre deux alvéoles sur

une durée d'essai relativement courte.

La deuxième difficulté est d'être capable, au cours de l'essai, de détecter l'apparition d'un endommagement sans mettre d'instrumentation dans la zone qui s'endommagerait (pour éviter que le forage de l'instrumentation ne modifie l'état de contrainte local). Pour cela, des mesures de pressions interstitielles et des mesures acoustiques et de vitesse sismique ont été réalisées.

L'influence du fluage sur le comportement THM a été prise en compte par différentes approches de modélisation. La viscoplasticité a été représentée soit par une loi simple (puissance et Norton) soit par un modèle thermo-élasto-viscoplastique anisotrope (en élasticité et en résistance) développé par Manica et al 2017. Les résultats ont montré que le fluage réduit la surpression générée par relaxation des contraintes lors du transitoire thermique et donc la contrainte effective en champ lointain à l'entraxe entre deux alvéoles.

Le creusement de l'alvéole induit un endommagement en champ proche de l'alvéole (extension maximale inférieure au diamètre de l'alvéole), qui ne peut pas être représenté par une approche élastique alors que l'approche élasto-plastique le permet. La comparaison entre une approche thermo-poro-élastique et thermo-poro-élasto-plastique a montré qu'à l'entraxe entre deux alvéoles, les évolutions des pressions



Simulation de la réponse THM du Callovo-Oxfordien : prise en compte de la viscosité du Callovo-Oxfordien pour la détermination du comportement THM. Comparaison avec l'approche thermo-poro-élastique : (a) comportement élastique représenté par une loi de Norton ou Puissance (b) modèle thermo-poro-élasto-plastique et thermo-poro-élasto-viscoplastique anisotrope (en élasticité et en résistance) Manica et al 2017

interstitielles et des contraintes effectives sont similaires. Il n'y a pas d'effet de la zone fracturée en champ proche sur le comportement THM en champ lointain.

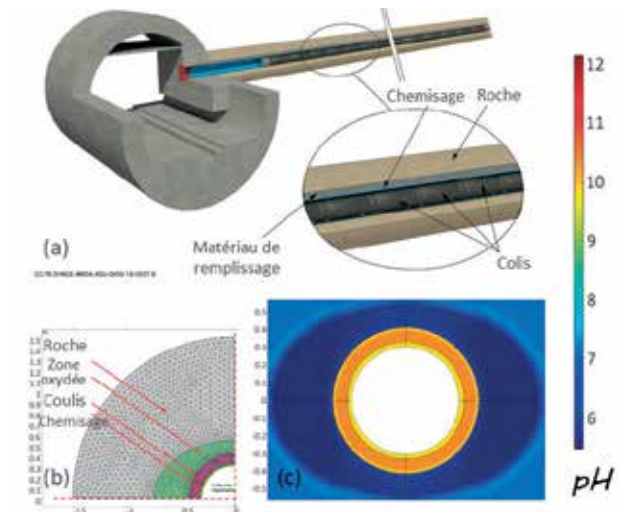
L'ensemble de ces simulations a montré que l'approche thermo-poro-élastique donnait les pressions interstitielles et les contraintes effectives les plus élevées, ce qui a conforté son utilisation pour le dimensionnement thermique des quartiers HA, suivant une approche enveloppe prudente.

### Modélisation de l'évolution chimique de l'alvéole HA

Le matériau de remplissage cimentaire à l'extrados du chemisage de l'alvéole HA a pour fonction de neutraliser l'acidité provenant des argilites oxydées en champ proche de l'alvéole lors de son creusement.

Grâce aux connaissances acquises depuis plus de 20 ans sur le comportement chimique des matériaux argileux et des matériaux cimentaires, différentes formulations sont actuellement à l'étude et font l'objet de caractérisations en laboratoire « jour ».

En parallèle, des simulations numériques ont été menées en 2018-2019 pour tester le comportement chimique de ces formulations en situation de stockage et évaluer leur capacité à remplir leur fonction. Ces simulations ont mis en jeu des processus géochimiques complexes (dissolution/précipitation de



Simulation du pH de l'eau au sein des matériaux à proximité du chemisage d'une alvéole HA : (a) schéma illustratif d'une alvéole HA, (b) maillage numérique avec iCP (Nardi et. al, 2014) et (c) illustration du pH simulé quelques années après l'injection du matériau cimentaire

Témoignage de  
Benoît  
COCHEPIN



## Benoît COCHEPIN

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

Depuis plus de 10 ans, l'Andra a noué des partenariats majeurs dans le domaine du transport réactif pour le développement des outils de simulations et la réalisation des simulations (BRGM, Amphos, CEA, etc.). Par ailleurs, l'Andra a conservé une capacité de réaliser en propre des simulations numériques, en particulier sur les composants dont elle est le maître d'ouvrage tels que l'alvéole HA ou les scellements de galerie.

L'Andra tend également depuis plusieurs années à faire évoluer les couplages des modèles chimiques avec d'autres phénomènes tels que l'hydraulique, la corrosion des aciers ou la mécanique des milieux argileux. La mise en œuvre de ces modèles couplés nécessite par ailleurs de faire développer des méthodes numériques innovantes en lien avec le calcul haute performance ou l'intelligence artificielle.

minéraux, échange d'ions à la surface des argiles, phénomènes redox...), couplés à la thermique et hydraulique. Les résultats de ces simulations, évalués sur la base d'une liste d'indicateurs chimiques (pH, composition de l'eau ...), ont permis de définir un domaine de composition de coulis satisfaisant les fonctions attendues, et également de mettre en évidence le rôle des patins centreurs pour garantir une épaisseur minimale de coulis cimentaire.

## LE CREUSEMENT, LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET LE MONITORING DES ALVÉOLES DE DÉCHETS MA-VL

### Démonstrateur du comportement mécanique des revêtements (galeries, alvéoles MA-VL)

Le programme d'essais technologiques 2019 a mis l'accent sur l'intégration des matériaux de revêtements compressibles pour des méthodes de construction traditionnelles. Des tests de différents matériaux (sous forme de panneaux) ont été réalisés en surface dans l'expérimentation RTC (Revêtement traditionnel avec une couche compressible) et se poursuivront par des essais d'installation en galerie GCS (Galerie de conception souple) du Laboratoire souterrain, préfigurant la réalisation dans la galerie GRD6 de l'expérimentation OMA. Cette expérimentation OMA constitue le démonstrateur d'un ouvrage se rapprochant le plus possible du concept des alvéoles MA-VL, adapté aux contraintes opérationnelles du Laboratoire souterrain (par exemple : creusement en sections divisées au brise-roche hydraulique, diamètre à une échelle réduite 0.9:1).

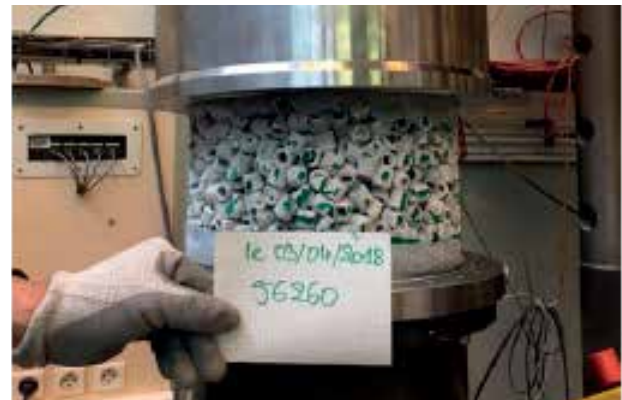
Son objectif est de montrer i) la faisabilité technologique de réalisation de galeries de grande taille représentatives des futures alvéoles MA-VL et ii) la capacité à mettre en place et le fonctionnement d'un dispositif de monitoring adapté à ce type d'ouvrage. L'année 2019 a vu l'installation des premiers forages pour le suivi de la réponse hydromécanique au creusement ainsi que la définition et la spécification de l'expérimentation OMA. L'expérimentation contribuera également à consolider les connaissances sur le comportement hydro-mécanique d'un alvéole MA-VL, en particulier la confirmation attendue de l'influence limitée du diamètre, et elle permettra d'apprécier plus finement le rôle du soutènement compressible sur la tenue mécanique de l'alvéole.

Par ailleurs, le programme de caractérisation des voussoirs VMC®, voussoirs bicouche, qui intègrent à leur extradoss une couche compressible à base de coques en argilite (provenant de l'excavation, traitée et cuite) agglomérées entre elles par un coulis cimentaire s'est poursuivi avec :

- la caractérisation du comportement hydro-mécanique et la définition des caractéristiques principales du matériau compressible, via des essais œdométriques sous différentes conditions réalisés au CERMES/Euro Geomat Consulting (EGC) ;
- la préparation d'essais sur anneau complet, simulant des chargements mécaniques à long terme sur la dalle d'essais de l'IFSTTAR, qui permet d'appliquer les contraintes sur les anneaux de voussoir de 6 m de diamètre avec ou sans matériau compressible (type VMC et autres).



Photographie de test de mise en place de panneau compressible réalisé en surface



Photographie de mise en place d'un échantillon de coque de voussoir compressible pour un essai œdométrique (CERMES)



Localisation des forages de pression interstitielle autour de la galerie GRD6 pour suivre la réponse hydromécanique au creusement

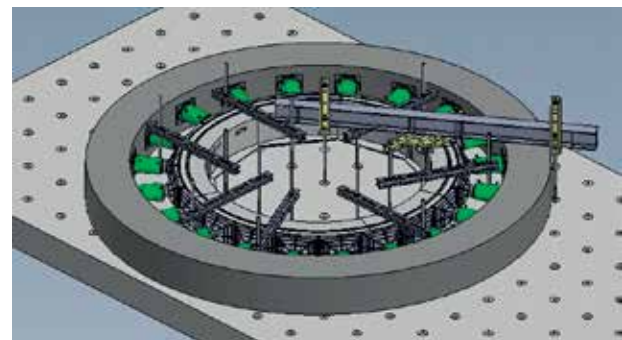


Schéma du dispositif pour tester les anneaux de voussoir à l'IFSTTAR

Témoignage  
Mélodie  
LUNDY

### Expérimentation DRO (Diffusion de radionucléides en présence de molécules organiques)

Certains déchets MA-VL contiennent des composés organiques (cellulose, plastique...) qui vont progressivement se décomposer dans les conditions d'un alvéole MA-VL. Les produits de dégradation de ces déchets organiques sont constitués d'un ensemble de molécules organiques dont une partie, les moins interagissantes, migrera au-delà des alvéoles, vers la roche argileuse du Callovo-Oxfordien. Parmi ces molécules, certaines ont la capacité d'interagir par complexation avec certains radionucléides. Pour compléter les différentes études menées en laboratoire « jour » depuis plus d'une dizaine d'années, une expérimentation in situ dédiée a été lancée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne en 2019. Elle a pour objectif, dans sa première phase, d'acquérir des données sur le comportement de différentes molécules organiques au contact de la roche argileuse du Callovo-Oxfordien, notamment en caractérisant leurs propriétés de diffusion et leur stabilité chimique au cours du temps.

Le principe de l'essai consiste à faire circuler dans un forage, au contact de la roche argileuse, de l'eau dans laquelle la molécule organique à étudier est injectée. L'acide  $\alpha$ -isosaccharinique (ISA), composé issu de la dégradation de la cellulose, est la première molécule organique à avoir été retenue pour être injectée, en raison de ses capacités de complexation vis-à-vis de certains radionucléides et de sa présence dans certains types de déchets MA-VL. L'injection a été réalisée en mai 2019 et des prélèvements sont depuis effectués régulièrement pour suivre l'évolution de la composition de l'eau (dont la concentration en ISA) et la présence de populations bactériennes qui pourraient consommer l'ISA et contribuer ainsi à sa disparition (phénomène de biodégradation). L'interprétation des données obtenues permettra de caractériser les différents processus en jeu dans le devenir de l'ISA (diffusion, sorption, biodégradation éventuelle).



Expérience DRO : photographie d'un module de circulation d'eau raccordé au forage PAC1001 dans la galerie GEX du Laboratoire souterrain et permettant de faire circuler la solution contenant l'ISA au contact de la roche

## LE COMPORTEMENT DU CALLOVO-OXFORDIEN AU VOISINAGE DES OUVRAGES SOUTERRAINS

### Autocolmatage de la zone endommagée du Callovo-Oxfordien au pourtour immédiat des ouvrages

Dans le cadre du programme développé par le groupement de laboratoires de recherche « Comportement mécanique des structures et des composants des stockages » (MOUV), plusieurs campagnes d'essais ont été réalisées en laboratoire « jour » pour appréhender finement le processus d'auto-colma-

Témoignage de  
Jean  
TALANDIER



## Mélodie LUNDY

Ingénieure expérimentations en géochimie, Service Transferts, Direction de la Recherche et Développement

La mise en œuvre de la première phase de l'expérimentation DRO (Diffusion de radionucléides en présence de molécules organiques) a nécessité deux années de préparation, notamment pour dimensionner et fabriquer les modules de circulation d'eau et d'échantillonnage, dont la conception bénéficie de notre retour d'expérience de 15 ans dans la conduite d'essais géochimiques au Laboratoire souterrain. Avec l'appui de nos partenaires scientifiques (CEA, BRGM), il a également fallu déterminer la solubilité de l'ISA dans l'eau porale du Callovo-Oxfordien, développer des méthodes analytiques ou encore estimer, au moyen de modélisations prédictives en transport réactif, la durée et la fréquence d'échantillonnage adéquates pour cet essai de diffusion.

Cette expérimentation in situ présente deux apports majeurs par rapport à des essais menés en laboratoire « jour » : d'une part, elle permet la prise en compte du fond géochimique naturel, avec les nombreux éléments traces qui sont naturellement présents dans l'eau porale du Callovo-Oxfordien, et, d'autre part, elle offre l'opportunité d'acquérir des données sur le rôle éventuel de micro-organismes qui pourraient être capables de dégrader l'ISA. Dans la suite de l'expérimentation, le comportement d'une deuxième molécule organique sera caractérisé : il s'agit de l'acide ortho-phtalique, qui est un composé issu de la dégradation du PVC. Le dimensionnement d'un essai d'injection de radionucléides au contact du Callovo-Oxfordien en présence de complexants organiques pourra ensuite débiter.

tage des argilites au niveau de l'unité argileuse (UA) du Callovo-Oxfordien et explorer les capacités d'auto-colmatage des argilites au sein de l'Unité silto-carbonatée (USC) et de l'Unité de transition (UT).

Les essais réalisés sur échantillons de l'UA en laboratoire « jour » ont confirmé la capacité des argilites à se colmater en présence d'eau liquide : les fissures se referment et la perméabilité à l'eau diminue significativement pour approcher celle des argilites non fracturées. Le processus est mécaniquement réversible avec une réouverture des fractures dès lors notamment qu'il y a séchage, la mémoire des fractures dans le matériau étant conservée. Ceci corrobore les mesures de propriétés mécaniques et de pression d'entrée de gaz réalisées sur des matériaux endommagés et saturés qui se révèlent inférieures à celles des argilites non fracturées.

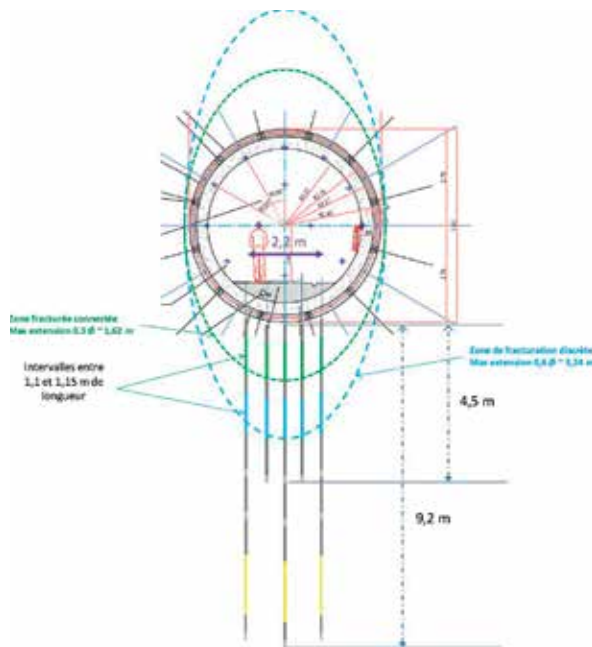
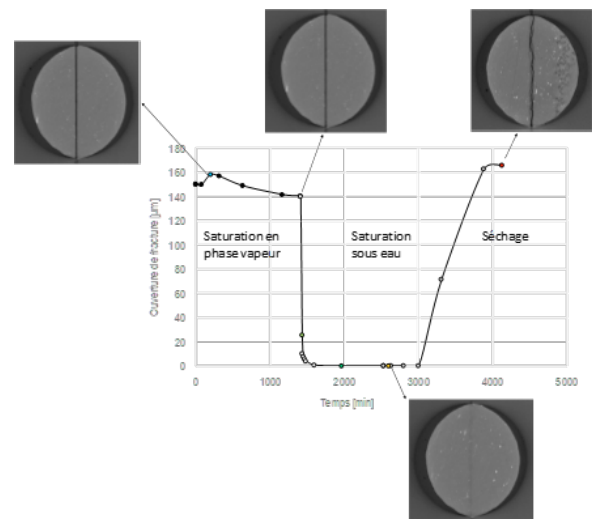


Schéma de l'expérimentation OHZ-hydratation avec les forages pour les tests hydrauliques et pneumatiques depuis la galerie GER

À plus grande échelle, dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, une campagne de tests hydrauliques a été effectuée en juillet 2018 dans les forages OHZ-hydratation de la galerie GER, où des chambres de mesure ont été placées dans la zone endommagée induite par le creusement de la galerie. Les résultats ont confirmé les observations faites lors de la première campagne de tests en 2016 : les perméabilités à l'eau sont faibles et diminuent dans le temps (valeurs majoritairement comprises entre  $10^{-11}$  et  $10^{-12}$  m/s). Un des intervalles d'un forage OHZ localisé dans la zone endommagée a fait l'objet d'un test d'injection de gaz à débit constant en août 2018. Ce test montre que la zone endommagée, bien qu'ayant retrouvé des perméabilités à l'eau faibles du fait de l'auto-colmatage, laisse entrer le gaz pour une faible valeur de pression de gaz, entre 0,6 et 0,7 MPa (contre jusqu'à 10 MPa de pression d'entrée de gaz pour les argilites du Callovo-Oxfordien non fracturées).



Visualisation par tomographie à rayons X de l'auto-colmatage sur un échantillon d'argilite du Callovo-Oxfordien réalisé au laboratoire 3SR à Grenoble



## Jean TALANDIER

Ingénieur géomécicien, Service Mécanique des Fluides et des Solides,  
 Direction de la Recherche et Développement

Le devenir de la zone endommagée après la fermeture de Cigéo est une donnée importante pour l'évaluation des écoulements d'eau et de gaz, ainsi que de la migration éventuelle de radionucléides le long des ouvrages souterrains, depuis les alvéoles de stockage jusqu'aux ouvrages d'accès, puits et descenderies. Les observations réalisées à plusieurs échelles ont montré que lors de la resaturation des ouvrages, les fractures initiales générées par le creusement du Callovo-Oxfordien au pourtour immédiat des ouvrages souterrains s'auto-colmataient, ce qui conduit ainsi à une diminution significative des conductivités hydrauliques de la zone endommagée tendant vers celle de la roche non endommagée.

Cette cicatrisation hydraulique résulte de plusieurs processus, et notamment du comportement des smectites présentes dans les argilites du Callovo-Oxfordien, minéraux argileux qui ont la remarquable propriété de gonfler en présence d'eau. Les résultats obtenus en 2018, tant sur échantillons qu'in situ dans le Laboratoire souterrain, renforcent l'analyse par l'Andra de la capacité du Callovo-Oxfordien mécaniquement endommagé à se cicatriser hydrauliquement, comme cela est d'ailleurs observé dans d'autres roches argileuses, comme l'Opalinus Clay en Suisse ou l'argile de Mol en Belgique, envisagées pour un stockage géologique profond.

## LES OUVRAGES DE FERMETURE

Témoignage  
Laurent  
CALSYN

### Poursuite des travaux sur la faisabilité technologique des ouvrages de fermeture et la compréhension de leur comportement hydromécanique dans le temps

En 2018, les expérimentations de longue durée sur les ouvrages de fermeture au Laboratoire souterrain de Meuse/ Haute-Marne se sont poursuivies, notamment celles concernant le suivi de la stabilité de la roche autour de ces ouvrages (CDZ) et l'hydratation (naturelle et artificielle) des matériaux à base de bentonite envisagés pour les noyaux des scellements et des matériaux à base d'argilites excavées pour les remblais, dans différentes configurations de composition de matériau et d'échelle spatiales (essais PGZ, NSC, BHN, REM, NIH).

Ainsi pour l'expérimentation CDZ « essai de compression de l'EDZ », qui représente notamment l'effet de la pression de gonflement d'un noyau de scellement sur la roche, un cycle de chargement sous hydratation avec un palier de chargement à 4 MPa a été effectué entre octobre 2017 et juillet 2018. Durant ce palier, des tests de perméabilité ainsi qu'un test d'injection de gaz dans

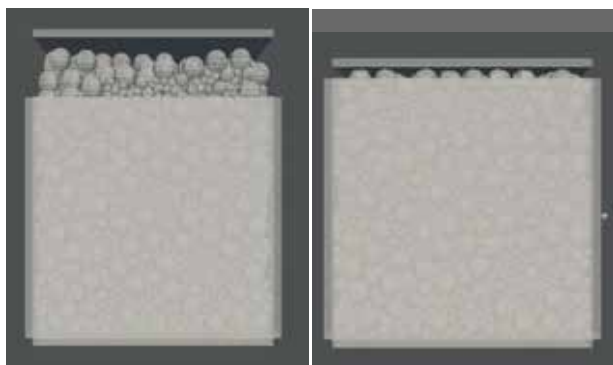
un intervalle ont été réalisés. Un cycle de chargement rapide a également été effectué pour évaluer le comportement mécanique de la zone endommagée. Les observations ont montré la capacité de cicatrization hydraulique de la roche endommagée et la capacité de cette dernière à absorber la contrainte de gonflement.

## LES COLIS DE STOCKAGE

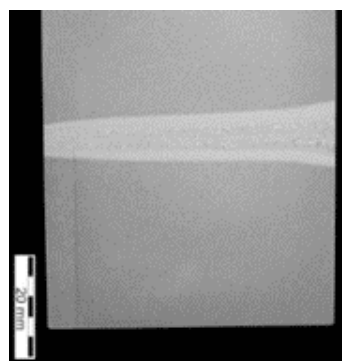
### Qualification des modes opératoires de soudage (QMOS) par Faisceau d'électrons (FE) des conteneurs de stockage des colis de déchets HA

Témoignage  
François  
VASSALLO

L'assemblage du fond sur la virole et du couvercle sur le corps des conteneurs de stockage HA sont des opérations prévues d'être réalisées par soudage au faisceau d'électrons (FE). Ce procédé spécial modifie localement les propriétés métallurgiques du métal, dont certaines ne sont pas contrôlables sur le produit fini. Dans le cadre de l'évaluation de la performance de sûreté en exploitation et après fermeture de Cigéo, il convient donc de s'assurer en amont que celles-ci satisfont les exigences. Ceci a été mené en 2018 à partir de maquettes représentatives soudées suivant un mode opératoire de soudage (MOS) précis.



(a) (b)  
Formulation des matériaux destinés aux noyaux de scellements à partir de pellets bentonite/argilites. Détermination du domaine de composition optimal par simulation numérique : (a) génération de particules et (b) dépôt des particules sous gravité



Vue en coupe d'une soudure FE



## Laurent CALSYN

Correspondant scientifique au sein de l'équipe projet Cigéo,  
Direction de la Recherche et Développement

Les propriétés favorables de la formation hôte du Callovo-Oxfordien contribuent à limiter et retarder le transfert des radionucléides. Les ouvrages de fermeture (scellements, remblais) complètent le dispositif en limitant les flux d'eau au sein du stockage qui pourraient entraîner une voie de transfert des radionucléides privilégiée par rapport à celle du Callovo-Oxfordien. Sur le long terme, la sûreté de Cigéo est assurée par le Callovo-Oxfordien et les scellements des ouvrages de liaison (puits et descenderies).

La conception et l'évaluation du comportement des scellements (hydraulique, hydromécanique et géochimique) fait l'objet d'études en laboratoire « jour », au Laboratoire souterrain et de simulation numérique depuis longtemps. L'Andra dispose déjà d'une importante base de connaissances, renforcées par les

travaux similaires menés par nos homologues.

Nous poursuivons néanmoins nos efforts pour consolider et préciser cette base en vue du dossier de la demande d'autorisation de création de Cigéo et des démonstrateurs de scellements prévus dans la phase industrielle au début de Cigéo. Il s'agit notamment de définir un domaine de composition des noyaux des scellements et remblais (par exemple en termes de pourcentage d'argilites et de bentonite, de taille de pellets, d'assemblage de pellets, de densité des pellets...) afin de répondre aux exigences de l'Andra. Par ailleurs, nous travaillons aussi à l'optimisation des scellements et remblais dans le cadre de leur mise en œuvre industrielle, afin d'accroître la maîtrise de leurs caractéristiques à la mise en place.

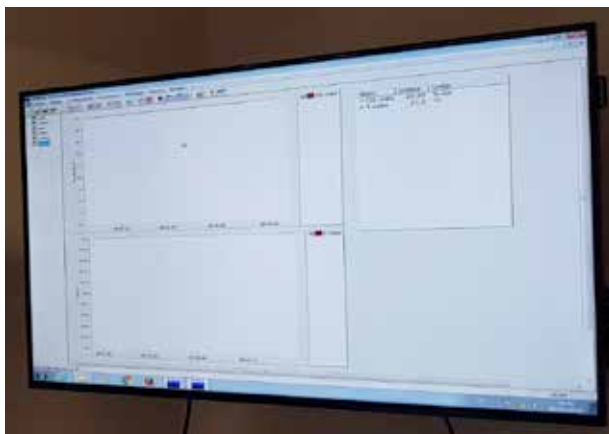
Des essais préliminaires sur éprouvettes simplifiées ont permis d'appréhender le soudage FE sur forte épaisseur et de sélectionner les paramètres opératoires pour obtenir le profil de pénétration souhaité. Les jeux de paramètres ont été transcrits dans un descriptif du mode opératoire de soudage (DMOS) pour permettre de réaliser l'épreuve de qualification par un soudeur qualifié, en présence d'un examinateur. Ce document est une procédure de réalisation qui permettra, par la suite, d'effectuer les soudures en série et d'obtenir un niveau de qualité constant.

L'épreuve de qualification s'est faite sur des assemblages représentatifs de la soudure du fond et du couvercle en acier P285NH amélioré et de 55 mm d'épaisseur. Les contrôles non destructifs, essais et examens permettant de prouver la santé métallurgique des assemblages ont été effectués et déclarés conformes.

Témoignage  
Loïc  
DUBRULLE

### Résistance à l'explosion des conteneurs de stockage en béton pour déchets MA-VL

Dans le cadre de la justification des performances des conteneurs de stockage MA-VL pendant la phase d'exploitation, des essais d'explosion dans un conteneur béton ont été réalisés pour déterminer sa tenue mécanique en cas de déflagration interne causée par un dégagement de dihydrogène par certains colis primaires de déchets MA-VL.



Photographies des écrans de contrôle du dispositif d'essai et des capteurs de concentration d'oxygène et de température du logement interne du colis de stockage



## François VASSALLO

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

Les soudures dans le domaine de l'industrie, et plus particulièrement dans le nucléaire, demandent une exigence de haute qualité, au regard des spécifications de fonctionnement des composants concernés.

Pour les conteneurs de stockage des colis de déchets HA, il est nécessaire que les soudures soient d'un niveau de qualité métallurgique équivalent au reste du conteneur : il s'agit de garantir leur tenue dans le temps (corrosion et mécanique) et ainsi la spécification d'étanchéité du conteneur de stockage sur plusieurs centaines d'années. Cette assurance passe par la qualification de modes opératoires de soudage (QMOS). L'Andra détient désormais les deux QMOS qui prouvent la fabricabilité et le respect des exigences concernant les soudures au faisceau d'électrons des colis de stockage HA. Il s'agit d'une étape importante vers l'industrialisation de la réalisation des colis de stockage HA, et une donnée essentielle pour le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo.



## Loïc DUBRULLE

Ingénieur conception des colis  
de stockage, Service Ingénierie  
des Conteneurs de Stockage,  
Direction de l'Ingénierie

Cet essai d'explosion, inédit pour l'Andra, est venu clôturer une campagne d'études et d'essais de diffusion d'hydrogène gazeux à travers un conteneur de stockage en béton armé de type CS4 de déchets MA-VL, réalisée en partenariat avec l'Ineris entre 2015 et 2018. Il s'inscrit dans le cadre plus large d'études de sûreté visant à comprendre le comportement de l'hydrogène produit au sein de colis de stockage pendant la phase d'exploitation et la phase après-fermeture de Cigéo. Afin d'obtenir des résultats au plus proche de la configuration du projet Cigéo, l'Andra a fourni à l'Ineris un démonstrateur échelle 1:1 de type CS4.1 pour réaliser des essais de perméabilité au gaz des parois en béton armé du conteneur de stockage. Cette première phase d'essais a permis de conclure que la concentration du gaz s'échappant permet de ne pas atteindre la Limite Inférieure d'Explosivité. La concentration ATEX n'est donc pas atteinte. Pour autant, l'Andra a décidé de poursuivre et d'étudier les conséquences mécaniques d'une explosion interne. Ce type d'expérimentation a nécessité la mise en place par l'Ineris de conditions d'essai spécifiques : plan de maîtrise des risques dédié, mise en place d'une injection d'air de secours pour diluer le mélange air/H<sub>2</sub> injecté dans le conteneur, utilisation d'explosimètres, déport des mesures dans une salle de contrôle et mise en place de protections physiques autour du colis. L'absence d'endommagement sur le conteneur MA-VL, après explosion interne, confirme sa tenue satisfaisante y compris si l'hydrogène était libéré en « bouffée ».

Un démonstrateur échelle 1:1 de type CS4.1, avec un couvercle vissé, clavé et instrumenté, a été équipé d'une traversée étanche pour permettre l'injection de dihydrogène jusqu'à une concentration dans le conteneur de 32,5 % en volume, pour une réactivité maximale.

Les résultats de l'essai d'explosion montrent un pic instantané de surpression jusqu'à 5 MPa dans le conteneur, lié au développement de la flamme et se traduisant par une montée de la température de l'air du conteneur jusqu'à 260 °C. L'évacuation des gaz de combustion s'est effectuée à l'interface entre le conteneur et le liant de clavage, qui s'est légèrement ouverte lors de la montée en pression. Les observations après essai ont montré l'absence d'endommagement sur le conteneur. Seul le décollement du liant de clavage à l'interface avec le conteneur a pu être relevé. La tenue satisfaisante des conteneurs de stockage en béton pour les déchets MA-VL à l'explosion a ainsi été vérifiée.

#### **Essai de mesure de remise en suspension de particules suite à la chute d'un colis de stockage MA-VL en béton armé**

Cet essai destructif, inédit pour l'Andra, rentre dans le cadre plus large d'une campagne d'études et de mesures visant à déterminer le facteur d'atténuation d'un colis de stockage en situation accidentelle de chute pendant la phase exploitation.

Cet essai, réalisé en collaboration avec l'IRSN et la société RIBA en juillet 2019, a consisté à faire chuter un démonstrateur de colis de stockage en béton armé de type CS4 sur une dalle indéformable, au sein d'une enceinte la plus hermétique possible. Afin d'obtenir des résultats au plus proche de la configuration du projet Cigéo, l'Andra a fourni à l'IRSN un démonstrateur de colis de stockage échelle 1 de type CS4.1, avec un couvercle vissé (sans clavage) équipé de 4 colis primaires factices simulant des fûts d'enrobé bitumineux. 4 ampoules d'un pulvérulent, sélectionné pour être distinguable des autres poussières générées par les débris du conteneur et avoir une capacité optimale à se mettre en suspension, ont été disposées sur les fûts. Le mode de chute avec fouettement a été retenu car il s'agit de la configuration qui entraîne l'endommagement le plus impor-

tant. Le pulvérulent qui s'échapperait des logements du conteneur de stockage est alors récolté par des préleveurs (*High Volume Sampler*) disposés autour de la dalle de chute.

L'essai a permis de mesurer un pic instantané de particules en suspension dans l'enceinte à partir du déclenchement de la chute et la diminution du taux en suspension dans les heures qui ont suivi. L'évacuation des particules s'est effectuée à l'interface entre le conteneur et le couvercle, zone dans laquelle des fissures et éclats sont apparus lors de la chute. Cet essai a permis de valider le protocole développé spécifiquement pour cette étude et qui sera utilisé lors d'une future campagne d'essais pour tester plusieurs configurations de chutes différentes (différentes hauteurs de chute, avec liant de clavage, couvercle coulé...).



Photographie du démonstrateur CS4.1 en position avant la chute



Photographie des positions des préleveurs autour de la dalle dans le cadre de l'essai de chute du démonstrateur CS4.1



## LES DÉMONSTRATEURS MÉCANIQUES

Témoignage  
François  
VASSALLO

### Atelier de conditionnement des colis de stockage HA

C'est dans la future installation nucléaire de base EP1 de Cigéo qu'aura lieu le conditionnement des colis primaires de haute activité (HA) en colis de stockage (CS). La fiabilité du procédé de conditionnement envisagé pour ces déchets sera démontrée via la réalisation d'un atelier prototype représentatif des contraintes d'exploitation en milieu nucléarisé.

L'année 2019 a été marquée par le lancement du marché sur cet atelier qui permettra non seulement de réaliser les essais de qualification sur chacun des postes du process de conditionnement des colis de stockage HA et sur le mode opératoire dans sa globalité, mais aussi de fabriquer ces postes et d'en assurer le fonctionnement et la maintenance.

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

- un poste de mesure de magnétisme et démagnétisation

avant soudage des composants des colis de stockage qui permet 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 et son système de positionnement des colis ;
- un poste d'usinage du bourrelet de la soudure et son système de positionnement et de maintien des colis ;
- un poste de contrôles non destructifs par ultrasons (TOFD) et courants de Foucault (CF).

Les études de réalisation ont démarré et la fabrication du premier équipement attendu de cet atelier, le moyen de soudage par faisceau d'électrons, débutera dès l'été 2020.

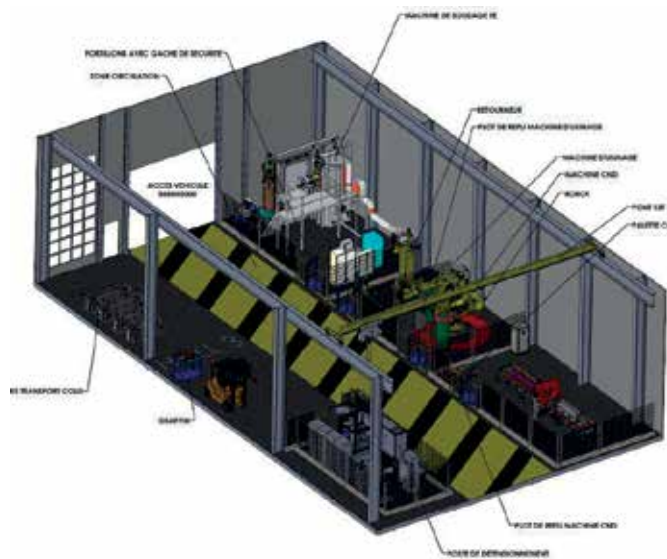


Schéma de l'atelier prototype de conditionnement des colis de stockage HA



## François VASSALLO

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

Chaque étape du projet suit un ordre précis qui conduit à valider étape par étape tous les postes de l'atelier puis la chaîne de conditionnement dans un second temps. Après nous être assurés de leur conformité, nous exploiterons chaque poste individuellement ainsi que le process complet en déroulant un programme d'étude du domaine de soudabilité. Celui-ci vise à identifier les limites et dérives acceptables, à obtenir des informations sur la fiabilité du matériel et acquérir les informations nécessaires pour bâtir un programme de surveillance et de maintenance. Grâce à cet atelier, nous

fabriquerons des maquettes échelle 1 pour réaliser divers essais ultérieurs, tester de nouveaux prototypes mais également former du personnel Andra à l'utilisation des postes de l'atelier. Toutes les informations recueillies au cours de ce projet contribueront à l'instruction du dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo, puis de création du futur atelier dans le bâtiment nucléaire de réception, de contrôle et de préparation des colis de déchets. L'expérience acquise sur cet atelier constituera un socle de connaissance technique pour le conditionnement des déchets HA dans Cigéo.

Témoignage  
Cyril  
BRIANCOURT

## Dispositifs de freinage du système funiculaire de descente des colis de stockage

Le système de freinage de secours embarqué sur le véhicule de transport des hottes desservant la descenderie est un élément important pour la protection lors de la manipulation des conteneurs et des colis de stockage. Ce système de freinage est constitué d'un chariot de freinage muni de 6 freins d'arrêt d'urgence (pinces FAU) et d'1 frein d'arrêt d'ultime secours (AUS). Il est complété en fond de fosse par 2 butoirs (BUT). La qualification des dispositifs de freinage s'inscrit dans la démonstration de sûreté de Cigéo en phase d'exploitation.

### Essais unitaires

Une première phase d'essais a été menée dans les locaux du CETIM, à Saint-Étienne, en septembre 2018. Elle visait à qualifier indépendamment les trois systèmes de freinage au cours d'essais élémentaires.

Le prototype de FAU testé lors des essais reprend une pince du FAU, son berceau de guidage et un caisson représentant une partie du châssis (raidi pour les besoins d'activation de l'essai). Lors du freinage d'urgence, les pinces serrent le rail de manière à créer un effort de friction contrôlé pour ralentir le véhicule, sans apport d'énergie hydraulique la pince serre le rail. Le frein est à sécurité positive. La conception modulaire de la pince permet d'atteindre différents niveaux de performance grâce à un changement de came et à l'insertion de cales dans l'empilage de rondelle ressort. En fonction des comes utilisées et des épaisseurs de cales, des plages d'efforts de  $-20\%/+5\%$  et de  $-5\%/+20\%$  ont été obtenues autour de la valeur nominale de serrage.



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, de vérifier leurs aptitudes à fonctionner dans un environnement représentatif et d'en améliorer la conception. Les résultats obtenus ont conforté les hypothèses retenues en APD.

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 que, en cas de défaillance d'approvisionnement ou d'arrêt de production d'un produit sur la période d'exploitation du funiculaire (120 ans), d'autres alternatives existent.

Ces essais s'intègrent dans la logique de montée en maturité technologique du funiculaire. La phase suivante sera l'intégration de ces systèmes dans un prototype échelle 1:1 du funiculaire qui permettra la validation des performances de freinage sur un banc d'essai représentatif de la pente de la descenderie colis et participera de la démonstration de la sûreté opérationnelle du funiculaire.



Frein d'arrêt d'urgence



Butoir



Frein d'ultime secours

Photographie des essais élémentaires sur les dispositifs de freinage embarqués du chariot de transfert utilisé pour la descente des colis de stockage par funiculaire dans une des deux descenderies de Cigéo : test d'adhérence en conditions quasi-statiques pour les freins d'arrêt d'urgence et en conditions statiques pour le frein d'arrêt d'ultime secours et le butoir.

Le patin AUS est un frein à affaissement. En cas de dérive de la vitesse, le véhicule s'affaisse sur les rails et les patins AUS, situés sous le châssis du véhicule, créent un effort de friction sous l'effet du poids du véhicule. L'effort de friction généré entre les patins AUS et le rail permet d'arrêter le véhicule. Une série de plaquettes de différentes matières a été qualifiée.

Le butoir est composé de plusieurs mors qui serrent un rail via des plaquettes de freinage. En cas d'accident, le véhicule percute le butoir et le met en mouvement. L'ensemble ralentit sous l'effet de la friction maîtrisée entre les mors et le rail pincé. Les essais ont été réalisés sur le butoir de fin de voie complet. L'effort de serrage des mors est réglable par l'intermédiaire de l'écrasement de l'empilage de rondelle ressort. La tension réelle de la tige a été mesurée (jauge de contrainte) dans le but d'extraire une corrélation avec le couple de serrage de la tige, son écrasement et l'effort de serrage au niveau du mors.

L'ensemble de ces essais élémentaires a permis notamment :

- une meilleure interprétation des résultats des calculs théoriques par comparaison avec le comportement réel des composants testés, grâce à l'exploitation de mesures délivrées par l'instrumentation (jauges de contraintes) des pinces de frein et du butoir ;
- l'appréciation du coefficient d'adhérence des différentes matières de friction testées, afin de mieux appréhender les pré-régimes et les matières pour les phases d'essais dynamiques du banc échelle 1:1 ;
- l'identification d'un problème mineur de conception de la pince de frein FAU lors de la qualification du serrage pour des usures de patin supérieures à 10 mm. La course du vérin va ainsi être allongée pour remédier à ce problème.

#### Essais échelle 1:1

Ces essais s'intégrant dans une logique de montée en maturité technologique du funiculaire, la phase suivante consiste à intégrer ces systèmes dans un prototype échelle 1:1 du funiculaire. Il permettra de valider les performances de freinage sur un banc d'essai représentatif de la pente de la descenderie colis et participera à la démonstration de la sûreté opérationnelle du funiculaire.

En 2019, la mise à niveau d'une halle couverte localisée en Meuse et destinée à accueillir le banc d'essai a débuté, pour une mise en service début 2021. La démarche retenue pour la réalisation des essais est la suivante :

- des essais dynamiques :
  - sur les dispositifs de freinage dans une configuration de piste de freinage propre,
  - sur les dispositifs de freinage dans des configurations dégradées (par exemple : rails rouillés, souillés par la graisse,...) ;
- des essais de performances nominales et mini/maxi connues et mesurées sur un tronçon donné ;
- d'autres essais pourront être réalisés pour mesurer la répétabilité de ces performances sur d'autres portions de voies.

Ces étapes seront conduites sur chacun des systèmes de freinage.

Les enchaînements simulés de systèmes de freinage pourront être testés, l'idée est de ne pas forcer mécaniquement des pertes substantielles de performance du système de freinage mais bien de simuler cette perte de performance et évaluer comment le système de freinage est actionné en fonction des survitesses détectées.

## LE MONITORING ET LES BASES DE DONNÉES

### Instrumentation du démonstrateur d'alvéole HA chauffant « ALC1605 » au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne : apport de la mesure de déformation et de température par capteurs à fibres optiques

Réalisé en novembre 2018 sur une longueur de 28 m, le démonstrateur d'alvéole HA ALC1605 a pour objectif d'étudier l'impact du chargement thermique des colis de déchets HA sur le comportement thermo-mécanique du chemisage en présence du matériau de remplissage en extradros du chemisage.

Pour suivre la montée en température du démonstrateur, de nombreux dispositifs de mesures ont été installés de façon systématique en interne de l'alvéole tels que des sondes de platine ou des jauges de contraintes ([www.lucoex.eu](http://www.lucoex.eu)) mais aussi des fibres optiques. ALC1605 permet ainsi de poursuivre la qualification des capteurs à fibre optique avec notamment la mise en place de deux systèmes permettant la mesure de la déformation du chemisage par des fibres optiques disposées en spirale. L'essai comporte trois génératrices équipées de câbles optiques permettant la mesure combinée des déformations axiales et de la température sur toute la longueur de l'alvéole, une section de mesure de température par capteurs PT100, une section de mesure de déformation par corde vibrante et enfin une cellule permettant des mesures géochimiques qui complètent l'instrumentation sur la partie externe du chemisage.

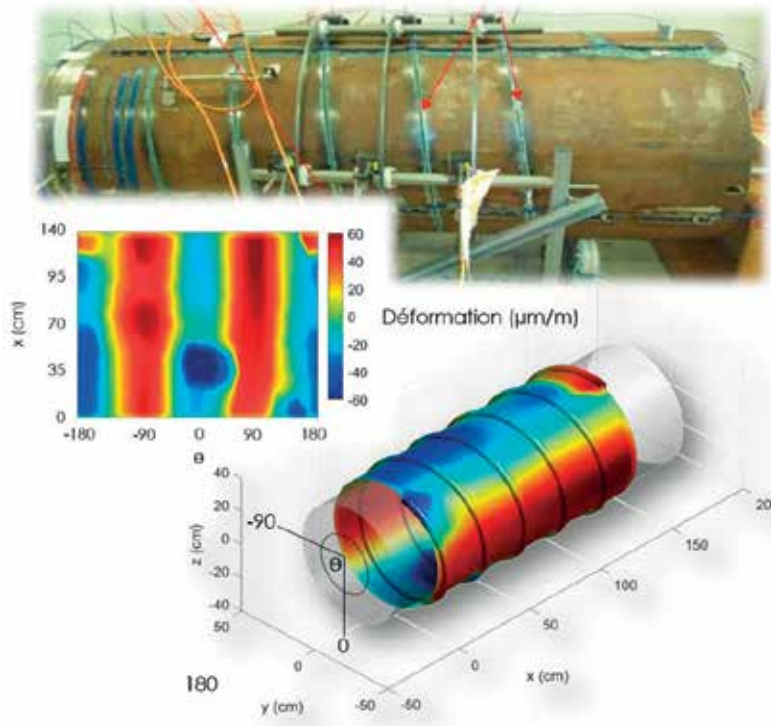
Témoignages «  
Johan  
BERTRAND  
Béatrice  
YVEN  
Julien  
COTTON



Johan  
BERTRAND

Ingénieur R&D instrumentation,  
Service Coordination  
opérationnelle, Caractérisation  
et Chaînes de données,  
Direction de la Recherche  
et Développement

Avec ce démonstrateur, l'Andra démontre le fort potentiel des mesures réparties par fibres optiques dans un alvéole. La pose de celles-ci sur trois génératrices et sur toute la longueur du chemisage doit permettre de suivre en 4D (dans l'espace et dans le temps) l'évolution combinée de la température et des déformations pendant toute la durée de l'expérimentation, depuis la phase d'injection du matériau de remplissage en extradros du chemisage, jusqu'à la montée en température.



Chemisage en préparation (en haut) avant la pose des boucliers de protection et déformations orthoradiales mesurées sur une chemise entre le 19/12/2018 et le 16/01/2019. Les valeurs de déformations négatives correspondent à un raccourcissement de la fibre, les valeurs positives correspondent à une élévation. Le raccourcissement (en bleu, valeurs négatives) à  $\pm 90^\circ$  associé à l'élévation (en rouge, valeurs positives) à  $\pm 180^\circ$  confirme la déformation par ovalisation du chemisage



## Béatrice YVEN

Ingénieure géologue, Service  
Coordination opérationnelle,  
Caractérisation et Chaînes  
de données, Direction de la  
Recherche et Développement

L'évolution des températures pendant la phase d'injection du matériau cimentaire en extrados du chemisage devrait révéler la prise du matériau. Ce matériau est injecté depuis le fond de l'alvéole. Il sera alors possible d'observer son injection, sa répartition et son homogénéisation sur toute la longueur de l'alvéole.



## Julien COTTON

Ingénieur systèmes et  
support aux projets, Service  
Coordination opérationnelle,  
Caractérisation et Chaînes  
de données, Direction de la  
Recherche et Développement

Les mesures optiques, réparties dans l'espace et répétées régulièrement dans le temps ouvrent des perspectives nouvelles en permettant de développer des approches et des méthodes d'analyse innovantes et adaptées pour la compréhension du comportement thermo-mécanique 4D d'un alvéole HA. Nos premiers résultats sont très encourageants à ce stade.

En complément des données enregistrées pour suivre le fonctionnement thermo-mécanique du démonstrateur, sa réalisation a permis de consolider les méthodes de pose et de protection des dispositifs de surveillance, dont l'instrumentation par fibre optique, sur la face externe du chemisage.

Différentes techniques d'analyses et d'approches de visualisation des mesures collectées seront explorées pour mieux quantifier l'amplitude de la déformation du chemisage et ainsi s'assurer en continu du maintien de la disponibilité des jeux de manutention des colis de stockage HA dans le chemisage. Le lancement de la chauffe est prévu au premier trimestre 2020.

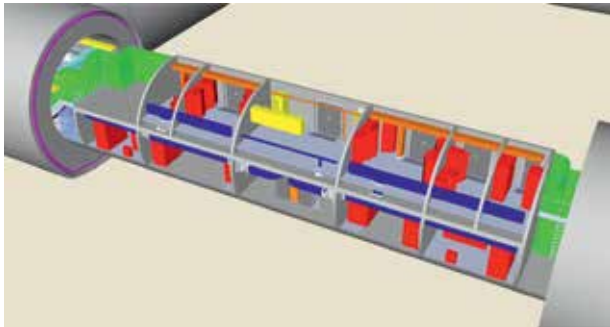
### Vers un jumeau digital 3D de Cigéo : les premières étapes d'intégration des données scientifiques

Un travail conjoint mobilisant la Direction de l'Ingénierie et la Direction de la Recherche et Développement a été initié en 2018, concernant l'habillage de la maquette numérique de Cigéo (BIM - Building Information Modeling) en processus physiques.

Ce premier travail a consisté à tester les modalités pratiques de passage (format et nature des données, etc.) de la maquette aux résultats de simulation pour le processus thermique. Il s'agissait d'extraire, de la maquette, les éléments de géométrie d'un alvéole HA, de filtrer les composants strictement nécessaires à la simulation du processus thermique, de créer un fichier d'entrée pour le code de calcul (notamment le maillage), de réaliser une simulation de référence, puis de transférer les résultats de simulation numérique (champs de température) vers le BIM.

Témoignages  
Béatrice  
YVEN  
Émilie  
BERNARD  
Guillaume  
PÉPIN

Sur ces bases, l'objectif final est d'intégrer des informations scientifiques de toutes natures (géologiques, processus physico-chimiques, etc.) qui remonteront des dispositifs de monitoring de la surveillance pour constituer un jumeau digital 3D fédérant toutes les informations de Cigéo. Ce jumeau numérique contribuera aux travaux de conception et d'observation/surveillance et apportera des éléments de réponse aux évaluations de sûreté en exploitation et en après fermeture.



Visuel de la maquette numérique de Cigéo



## Béatrice YVEN

Ingénieure géologue, Service Coordination opérationnelle, Caractérisation et Chaînes de données, Direction de la Recherche et Développement

La Direction de la Recherche et Développement s'est associée à la Direction de l'Ingénierie pour développer la maquette numérique de Cigéo (BIM). Cette représentation géométrique 3D du futur centre industriel de stockage Cigéo vise à réunir toute l'information physique et technique nécessaire à sa conception, sa construction, sa recette, son exploitation, ses éventuelles évolutions puis sa fermeture. Elle sera constituée de tous les objets de Cigéo (bâtiments, infrastructures, réseaux) et comprendra aussi des données sur le milieu géologique et l'environnement de surface ainsi qu'une description des relations entre ces objets et leurs propriétés. Cet ensemble de données et connaissances permet d'analyser, de contrôler, de simuler le comportement de certains ouvrages ou quartiers de Cigéo mais aussi de détecter bien en amont de la construction les problèmes éventuels de design, d'interface, d'accessibilité, d'ergonomie, etc.

Les premiers éléments du modèle géologique 3D constitués des différentes limites des formations géologiques, dont le toit et le mur de la formation hôte du Callovo-Oxfordien issus notamment de la sismique 3D haute résolution réalisées en 2018-2019 ont été intégrés à la maquette numérique de Cigéo. Ces données ont permis aux ingénieurs travaillant sur l'architecture du stockage de vérifier rapidement le respect de certaines exigences comme les épaisseurs de garde saine de Callovo-Oxfordien de part et d'autre des installations fond de Cigéo. À terme, toutes les surfaces d'intérêt et les propriétés des formations pourront être accessibles dans la maquette numérique. L'élaboration de cette maquette numérique offre ainsi un véritable outil fédérateur en favorisant les échanges entre les différents métiers sur la base d'une référence commune, structurée et organisée.

Participer à ce grand processus de structuration, d'intégration, d'analyse, d'échange, de visualisation et d'exploitation de données pour le projet Cigéo est très motivant et donne un sens nouveau au travail de modélisation réalisé depuis une quinzaine d'années sur le site de Meuse/Haute-Marne.



## Émilie BERNARD

Responsable maquette numérique et BIM, Service Maquette numérique, Synthèse, Infographie et système d'information, Direction de l'Ingénierie

La maquette numérique de Cigéo (BIM) est une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles de l'installation. Elle a pour objectif, entre autres, de fédérer et partager la connaissance et les informations relatives aux différents composants et équipements de Cigéo et de son environnement naturel, afin de contribuer à disposer d'une base de référence fiable pour prendre des décisions tout au long de son cycle de vie. Les industries aéronautique et navale sont familières de l'outil BIM. L'industrie nucléaire s'y est engagée depuis plusieurs années.

On peut dire que l'Andra est à la pointe dans ce domaine. Dans ce cadre, et en lien avec la connaissance scientifique disponible, l'objectif des premiers travaux entre ingénieurs et scientifiques de l'Andra est d'examiner les modalités « d'habillage » de la maquette actuellement disponible en caractéristiques géologiques et en processus physiques, à l'échelle des composants de Cigéo. Deux démonstrateurs ont été initiés : d'une part, l'intégration des données de la géométrie des couches géologiques dans la maquette numérique, et, d'autre part, la récupération de la géométrie « projet » pour les simulations thermiques des quartiers HA et l'intégration des données issues des résultats des simulations dans la maquette numérique du projet.



## Guillaume PÉPIN

Chef du Service Évaluation et Analyse de Performance, Direction de la Recherche et Développement

Ce premier travail d'intégration des données scientifiques dans la maquette numérique de Cigéo (BIM) a permis d'identifier la nature des objets matériels figurant dans la maquette numérique et la manière de transférer, avec l'exemple de la thermique, les champs de température sur les objets de la maquette. Le niveau de détail de cette dernière étant très différent de celui nécessaire pour des simulations numériques (temps/espace), la difficulté principale est donc de trouver les bonnes « passerelles » qui permettent d'intégrer toutes les données scientifiques des processus phénoménologiques vers le BIM. Ce premier travail opérationnel sur la thermique sera ensuite étendu aux autres grandeurs des processus. À terme, il est possible d'imaginer intégrer au sein du BIM des modèles phénoménologiques dits « réduits » (comme des métamodèles), qui permettront d'accéder de manière quasi instantanée à l'ensemble des informations phénoménologiques espace/temps. Ces données pourront être comparées en temps réel et en 4D à celles issues de la surveillance : cette comparaison contribuera à s'assurer du bon comportement du stockage et son environnement géologique, notamment en prévision de l'après-fermeture. Il s'agit d'un challenge passionnant.

Témoignage  
Guillaume  
HERMAND

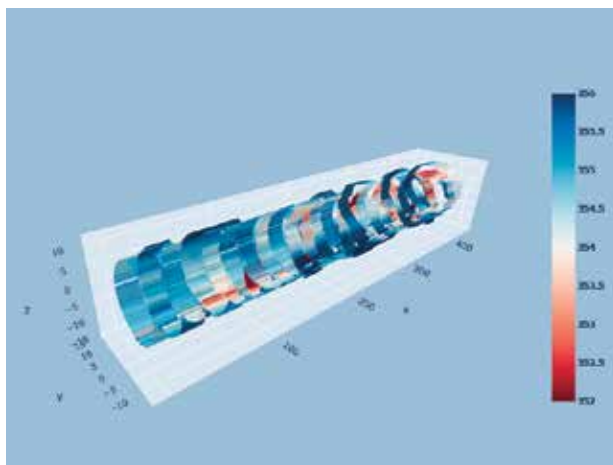
### SAM : un véhicule autonome pour l'auscultation des alvéoles HA

En 2019, un véhicule autonome pour l'auscultation des alvéoles HA a été développé et testé au Laboratoire souterrain de l'Andra par Arquiméa, une société spécialisée dans l'électronique de pointe. L'intérêt d'un dispositif robotisé comme SAM est de disposer d'un système de mesure capable de se mouvoir rapidement dans des espaces de petite taille tels que les futurs alvéoles de stockage des déchets HA du projet Cigéo. La mission de ce robot consiste à transporter en tout point des alvéoles des dispositifs de mesures pour le suivi des processus THMCR (thermique, hydraulique-gaz, mécanique, chimique et radiologique). SAM est nativement doté d'un système de géo-positionnement dans l'alvéole, d'une panoplie de capteurs tels qu'un baromètre, un thermomètre, etc. Il dispose également d'une roue équipée de trois capteurs laser d'une précision de 7  $\mu\text{m}$  afin de permettre une mesure fine de la géométrie interne des alvéoles. Enfin, SAM dispose

d'une plateforme afin d'embarquer des systèmes de mesure complémentaires.

Pendant l'été 2019, le robot SAM a été testé en situation réelle avec un capteur d'hydrogène embarqué dans le démonstrateur d'alvéole HA AHA 1605. En moins de deux heures, SAM a effectué des mesures géométriques longitudinales et circulaires de chacun des tronçons constituant le chemisage du démonstrateur et il a pu effectuer dans le même temps des mesures d'hydrogène repérées dans le temps et dans l'espace le long des 40 m du démonstrateur.

Cette méthode dite « mobilisable » est complémentaire aux moyens de mesures « à demeure » (in situ). Dans AHA 1605, SAM fournira une mesure de convergence qui pourra être inter-comparée aux mesures orthoradiales réalisées à l'extrados du chemisage. Il participe ainsi à l'obtention d'un suivi maîtrisé et réparti du suivi des processus à l'échelle des composants.



Mesures du rayon (mm) de l'alvéole AHA1605



Photographie du robot SAM



## Guillaume HERMAND

Ingénieur R&D et instrumentation, Service Coordination opérationnelle, Caractérisation et Chaînes de données, Direction de la Recherche et Développement

2019 marque une avancée significative pour la R&D de l'Andra dans le domaine de la robotique : SAM est le premier robot du genre développé et testé pour apporter une solution complémentaire ou alternative aux systèmes de surveillance dits « à demeure » dans un alvéole.

Cette première utilisation de SAM a permis de vérifier son bon fonctionnement dans des conditions proches de celles de Cigéo, et de tester sa capacité à acquérir les informations nécessaires au monitoring d'un alvéole HA vide. SAM a aussi démontré qu'une communication sans fil est possible et que son mode « autonome » est fonctionnel.

En 2020, les prochains essais de ce robot permettront de comparer les mesures et de suivre l'évolution des dimensions du démonstrateur d'alvéole AHA 1605 sous l'effet de son chargement mécanique par la roche. Il est également prévu des ajustements afin d'optimiser les aspects fonctionnement de SAM mais aussi de le rendre plus « intelligent » par l'implantation d'une IA (intelligence artificielle).

Ce travail de développement ouvre des perspectives prometteuses, par exemple le recours à des robots miniatures capables de se faufiler dans l'espace pluri-centimétrique entre les colis de stockage HA et le chemisage sur toute la longueur des alvéoles.

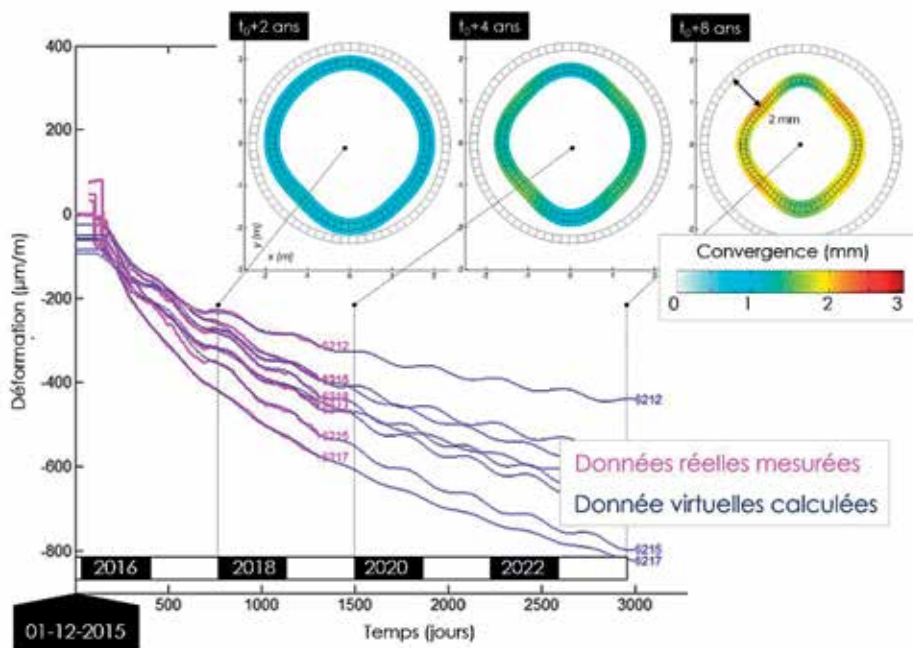
Témoignage  
Julien  
COTTON

## Machine-learning : estimation de la déformation des revêtements/soutènements de galeries/alvéoles

### MA-VL par une approche *data driven*

En 2019, l'Andra a développé un algorithme de machine-learning pour traiter des données extensométriques et suivre la convergence des revêtements en béton mis en place dans les galeries du Laboratoire souterrain. Basée sur les données acquises par les dispositifs de monitoring étudiés actuellement (extensomètres à cordes vibrantes principalement), cette approche *data driven* s'intègre dans le programme d'étude mené pour préparer la surveillance de Cigéo et plus particulièrement vérifier le maintien des fonctions de sûreté et de la récupérabilité des colis durant la phase d'exploitation.

À partir d'une forme initiale et théorique de la galerie, l'algorithme détermine itérativement en 4D (dans le temps et dans les trois dimensions de l'espace) une succession de solutions raffinées par minimisation de l'écart entre les données virtuelles qu'il génère et les données réelles issues des mesures quotidiennes réalisées au Laboratoire souterrain. Dans cette approche, la dimension temps ( $t$ ) est utilisée par un réseau de neurones pour prédire l'évolution des revêtements à court terme (1 mois, 1 an, 10 ans). Ainsi, il est possible de détecter des dérives et des singularités dans l'évolution du revêtement. En 2019, cette approche a été testée sur les données extensométriques de la galerie GER.



Prediction de la convergence en galerie GER au Laboratoire souterrain à partir de mesures extensométriques réalisées quotidiennement (déformations radiales et ortho-radiales)



## Julien COTTON

Ingénieur systèmes et support aux projets, Service Coordination opérationnelle, Caractérisation et Chaînes de données, Direction de la Recherche et Développement

L'approche *data driven* a permis d'estimer la convergence en tout point de la galerie GES du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne à partir de mesures ponctuelles de déformation radiales et ortho-radiales. Les résultats obtenus pour deux sections situées à 1 m l'une de l'autre soulignent de façon remarquable l'importance du positionnement des capteurs au sein d'une section pour l'estimation de la convergence de la roche et la déformation associée des revêtements/soutènements. Cette observation sera prise en compte dans les futures études de design des sections instrumentées prévues dans le démonstrateur d'ouvrage grand diamètre OMA, représentatif d'un alvéole de stockage de déchets MA-VL, qui sera réalisé en 2020 au Laboratoire souterrain. La comparaison entre les données virtuelles proposées par l'algorithme et les données réelles permet de mettre en évidence

un résidu. Lorsque le résidu est faible, l'algorithme décrit convenablement les données réelles. Lorsque le résidu reste significatif, il y a deux possibilités : soit on met en évidence des biais d'acquisition (capteurs mal couplés, inclinés ou inversés), soit l'approche géométrique n'est pas suffisante pour reproduire le phénomène. De ce fait, une perspective intéressante consisterait d'une part à étudier les biais de mesure et d'acquisition pour bien circonscrire la réponse des capteurs à une sollicitation (bruits, couplages, inversion dans les branchements des ECV, orientation des capteurs et sensibilité) et, d'autre part, à considérer un espace de fonctionnement plus proche de la réalité (lois mécaniques, voire couplage des lois thermiques et mécaniques). Il s'inscrira dans le développement d'un jumeau numérique capteur du Laboratoire souterrain qui sera initié dès 2020.

## LE LABORATOIRE SOUTERRAIN DU CENTRE DE MEUSE/Haute-MARNE : UN INSTRUMENT SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE EN SUPPORT AU DÉVELOPPEMENT PROGRESSIF DE CIGÉO, DEPUIS DÉJÀ PRESQUE 20 ANS

Dans le cadre de la loi de 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs, l'Andra a démarré en 2000 la construction du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne afin d'y mener des études et des essais in situ, à 490 m de profondeur. En complément des moyens d'investigation classique (travaux de reconnaissance, forages, investigations par sismique réflexion, essais et analyses sur échantillons, simulation numérique, etc.), le Laboratoire souterrain constitue un outil exceptionnel pour :

- confirmer la capacité de confinement des radionucléides par le Callovo-Oxfordien ;
- confirmer la constructibilité d'ouvrages souterrains dans le Callovo-Oxfordien ;
- évaluer d'une part les perturbations induites par le stockage sur le Callovo-Oxfordien et d'autre part la durabilité des composants ouvragés et des matériaux du stockage (béton, aciers, verre, etc.) en interaction avec le Callovo-Oxfordien ;
- tester des dispositifs de monitoring pour contribuer à la définition du programme de la surveillance de Cigéo ;



Photographie d'un démonstrateur d'alvéole HA dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne



Photographie de la galerie de conception rigide (GCR) du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

- évaluer les modalités de construction et de fermeture des ouvrages souterrains de manière intégrée et à échelles représentatives.

Depuis maintenant presque 20 ans, le Laboratoire souterrain accompagne les étapes de développement du projet Cigéo pour répondre aux besoins de conception et d'évaluation de sûreté. Les expérimentations se sont ainsi déployées progressivement sur un large spectre de domaines et de disciplines scientifiques et technologiques (hydraulique, mécanique, thermique, chimie, etc.). D'abord destinées à démontrer la faisabilité de principe du stockage des déchets radioactifs dans la couche argileuse du Callovo-Oxfordien (dossier 2005), les expérimentations ont ensuite été déployées en soutien à la conception du centre industriel de stockage géologique, puis en support au dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo, de la phase d'avant-projet sommaire à l'avant-projet détaillé. 2020 verra fêter les 20 ans du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

On relève à fin 2019 près de 19 000 points de mesure le long des 1 952 m de galeries.



Témoignages  
Émilie  
HURET  
Olivier  
ALAVOINE

## Les activités du Laboratoire souterrain en 2018-2019 : une programmation importante en forages et en expérimentations scientifiques associée au démarrage d'un nouveau chantier de creusement sur 2019-2024

En 2018 et 2019, les activités scientifiques et technologiques au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne ont été importantes et variées. 174 forages ont été réalisés dans le Laboratoire souterrain pour l'observation, les suivis géologiques, le prélèvement d'échantillons ou la mise en place de sondes et de capteurs. Certains d'entre eux sont associés au démarrage de nouvelles expérimentations scientifiques, comme :

- les expérimentations MAV et MAG pour « matériau de remplissage au contact de la roche argileuse », dédiées à l'étude des interactions entre les matériaux du stockage (verre des déchets HA et matériau de remplissage cimentaire) et la roche argileuse ;
- l'expérimentation (IBE pour « Investigations bulbe d'étanchéité »), mise en place depuis la niche expérimentale du puits principal à -445 m a pour objectif de vérifier le bon fonctionnement du bulbe d'étanchéité, au toit de la formation du Callovo-Oxfordien afin de limiter les circulations d'eau entre la roche argileuse et les formations supérieures calcaires (aquifères). Cette expérimentation a permis également de consolider sur plusieurs mètres la représentation des alternances de marne et de calcaire observées au toit du Callovo-Oxfordien ;
- l'expérimentation CRQ (pour « Comportement thermo-hydrromécanique 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 de déchets HA de Cigéo. Cette expérimentation s'inscrit dans la justification du dimensionnement thermique des quartiers HA retenus dans le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo.

Au total, 8 nouvelles expérimentations scientifiques et technologiques ont démarré depuis 2018 et plus de 80 expérimentations sont actuellement suivies au Laboratoire souterrain.



## Émilie HURET

Ingénieure géologue, Cheffe du Service Coordination opérationnelle, Caractérisation et Chaînes de données, Direction de la Recherche et Développement, Adjointe au directeur

2018 et 2019 ont été deux années riches en activités scientifiques au Laboratoire souterrain. Elles ont mobilisé tous les métiers de la Direction de la Recherche et Développement pour suivre les travaux de caractérisation et d'optimisation qui répondent pour la plupart aux demandes et engagements pris par l'Andra suite à l'instruction du dossier d'options de sûreté de 2015 et viennent consolider le socle de connaissances pour le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo. Cela représente plus de 189 forages réalisés et dédiés pour la plupart à la mise en place de nouvelles expérimentations scientifiques portant sur l'étude des interactions roche/matériaux, le développement de dispositifs de mesures et de surveillance innovants adaptés aux contraintes du milieu souterrain ou encore le suivi des processus hydromécaniques, chimiques, thermiques... à l'échelle des démonstrateurs technologiques représentatifs des alvéoles de stockage des déchets HA. Par ailleurs, 2019 marque le démarrage d'un nouveau chantier de creusement prévu jusqu'en 2025. Débutant quasi au moment des 20 ans du Laboratoire souterrain (2020), avec la collaboration entre 3 directions (la Direction de la R&D, la Direction de l'Ingénierie et le Centre de Meuse/Haute-Marne), ce chantier sera une nouvelle étape majeure de son développement, avec une logique plus forte encore vers l'industrialisation du stockage : il sera réalisé, entre autres, un démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets MA-VL proche de l'échelle 1:1, des essais scientifiques et technologiques relatifs aux ouvrages de fermeture (remblais et scellements) et des démonstrateurs d'alvéoles de déchets HA représentatifs du concept retenu pour le quartier pilote HA, prévu dans le cadre de la phase industrielle pilote qui démarrerait Cigéo.



## Olivier ALAVOINE

Responsable essais technologiques, Direction de l'Ingénierie

Les résultats des études d'APD réalisées par les maîtrises d'œuvre de Cigéo ont permis d'orienter le nouveau chantier 4 en 2019 sur de nouveaux développements technologiques (tests de matériaux technologiques divers, essais de remblai, prototype d'alvéole MA-VL) et d'en établir une première programmation avec la Direction de la R&D et celle du Centre de Meuse/Haute-Marne.

Les activités des années à venir seront intenses et contribueront à alimenter en données techniques et scientifiques les différents dossiers (de justification, de connaissances) en support à la demande d'autorisation de création de Cigéo, et en phase d'instruction du dossier de demande.

Concernant les essais technologiques, 5 nouveaux démonstrateurs d'alvéoles HA ont été réalisés ces deux dernières années dont le démonstrateur ALC 1605 (28 m de longueur), instrumenté en fibre optique pour le suivi de la température et de la déformation et ayant pour objectif de réaliser un essai de chauffe, représentatif de l'effet thermique que pourraient produire les colis de déchets HA. Par ailleurs, en 2019, le démonstrateur AHA1605 de 80 m (longueur d'un alvéole du quartier pilote HA) a été réalisé avec pour objectif de démontrer la faisabilité de mise en œuvre d'un dispositif complet de surveillance représentatif des besoins d'observation/surveillance anticipés pour Cigéo (mesures de déformation par fibres optiques et par cordes vibrantes, mesures des teneurs en gaz, mesures de corrosion...).

Enfin, en 2019, un nouveau chantier de creusement, le chantier 4, a démarré pour une durée de 6 ans. 97 mètres ont été creusés à fin 2019 pour la réalisation en cours d'un prototype de galerie de grand diamètre représentatif d'un alvéole de déchets MA-VL (essai OMA, de 10 m de diamètre et 80 m de long) et pour la préparation des essais de scellement et remblais qui seront menés ultérieurement dans des galeries créées spécifiquement.

En parallèle, des essais de caractérisation et de mise en œuvre en laboratoire « jour » ont démarré en 2019 pour différents types de matériaux compressibles de revêtements/soutènements. À l'issue de ces essais et des résultats acquis, une mise en œuvre au Laboratoire souterrain sera réalisée en 2020.



Photographie de la réalisation des forages géologiques dans la galerie GVA2



Photographie de la réalisation du démonstrateur d'alvéole HA AHA1606

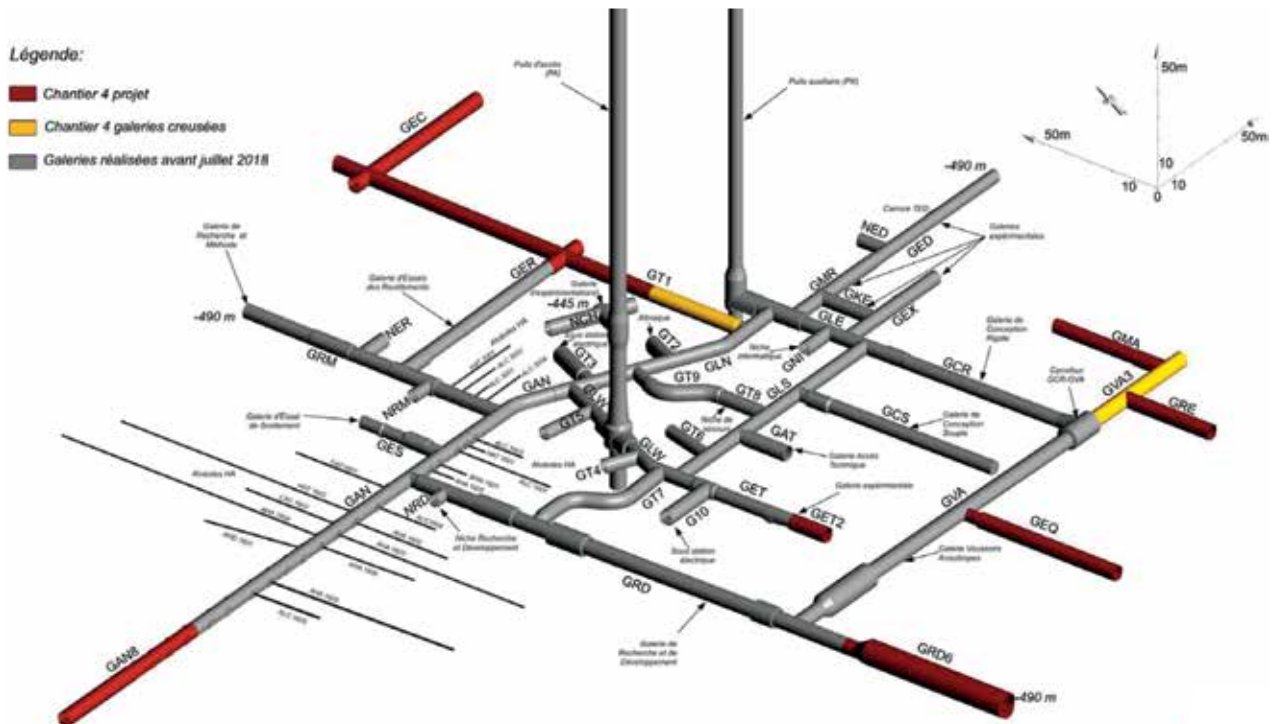


Schéma du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

## L'OBSERVATOIRE PÉRENNE DE L'ENVIRONNEMENT

Depuis plus de 10 ans, l'Andra a mis en place un dispositif unique d'observation de l'environnement à l'échelle du territoire afin de définir l'état de référence de l'environnement autour du projet Cigéo, d'en suivre ses évolutions sur la période séculaire d'exploitation de Cigéo et de discriminer les sources de ces changements. L'effort d'observation se concrétise par le déploiement de dispositifs de mesure en continu ou ponctuels de la qualité des différents milieux (eau, sols, air, etc.) et de la biodiversité sur une échelle d'observation élargie par rapport aux emprises de Cigéo, jusqu'à 900 km<sup>2</sup>.

↳ Témoignages  
Paul-Olivier  
REDON  
Catherine  
GALY

### Participation de l'OPE à la déclaration d'utilité publique du projet Cigéo (DUP)

Les observations à l'échelle du territoire doivent permettre de capter à la fois les incidences du projet Cigéo sur l'environnement mais aussi celles globales comme notamment le changement climatique ou les évolutions des pratiques agricoles. La caractérisation des incidences globales des perturbations sur les grands équilibres écologiques nécessite une analyse intégrée complexe à mettre en œuvre. Depuis 2005 est élaborée à l'échelle mondiale (MEA 2005) une vision transverse qui prend en compte les processus de rétroaction au sein des milieux et d'inter-relations entre les milieux pour définir les paramètres d'une gestion durable des écosystèmes au service des besoins humains d'approvisionnement en nourriture et fourniture, de régulation de la qualité des milieux (air, sol, eau) et culturels.



Photographie de la conservation des échantillons environnementaux dans une des cuves cryogéniques de l'Écothèque de l'OPE



## Paul-Olivier REDON

Ingénieur Service Observatoire Pérenne de l'Environnement,  
Direction de la Recherche et Développement

L'agriculture représente l'activité économique principale du territoire de Meuse/Haute-Marne, il est donc apparu important de travailler, parmi les différents services écosystémiques rendus à l'échelle de la zone d'étude de l'OPE, sur la production de biens agricoles par les terres cultivées (les « agroécosystèmes »).

La démarche de l'OPE est ici d'évaluer la capacité d'un territoire à fournir des produits agricoles à la société humaine (service d'approvisionnement).

Pour cela, des données du suivi des pratiques agricoles acquises à l'OPE en collaboration avec les chambres d'agriculture ont été utilisées pour calculer les quantités de céréales ou d'oléagineux produites annuellement dans la zone de référence de l'OPE. Ces quantités annuelles, traduites ensuite en valeur énergétique (calories), peuvent ainsi constituer un indicateur intégré permettant d'avoir une vue globale de la production agricole

du territoire. L'étude des productions végétales agricoles par le prisme des services écosystémiques est un premier exemple d'intégration des données de l'OPE, avant de se pencher prochainement sur l'évaluation d'autres services écosystémiques beaucoup plus complexes. Cet exemple illustre bien la nouvelle démarche de l'OPE qui vise à exploiter les données d'observation des écosystèmes menées depuis la création de l'OPE pour les traduire en fonctions écologiques (ici la production de biomasse), puis en indicateurs intégrés des services fournis dès lors que l'Homme en retire des bénéfices (ici une valeur alimentaire et économique). Un suivi pluriannuel de ces indicateurs doit à terme pouvoir permettre de détecter des changements de fonctionnement des écosystèmes, liés à des évolutions locales ou plus globales.

La communauté scientifique s'est depuis employée à développer des concepts et méthodologies permettant d'harmoniser et de rationaliser les études environnementales sur l'évaluation des services écosystémiques.

En 2018, l'OPE s'est à son tour engagé dans une démarche d'intégration des données environnementales qu'il acquiert en suivant, à l'échelle de son territoire d'étude, le cadre conceptuel d'évaluation des services écosystémiques défini par l'EFESE (Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques). Des initiatives similaires voient le jour depuis quelques années aux échelles régionales et dans des zones urbaines, mais peu s'intéressent aux territoires ruraux. L'objectif est, pour l'Andra, d'être à terme en capacité de présenter à la gouvernance de Cigéo et aux acteurs locaux les résultats des observations environnementales sous forme d'indicateurs intégrés, comparables et harmonisés, permettant notamment d'éclairer les réflexions sur l'aménagement et la qualité environnementale du territoire hôte du projet Cigéo.

L'agriculture étant un déterminant économique important du territoire, l'OPE s'est d'abord intéressé à caractériser puis à évaluer le service écosystémique de production de céréale et de fourrage. Un programme de recherche est en cours de construction en partenariat avec notamment l'université de Lorraine et l'INRAE pour caractériser de façon plus globale les services d'approvisionnement, de régulation de la qualité des milieux ou socio-culturel, comme la chasse par exemple, présents sur le territoire.



Photographie d'un relevé de données hydriques pour l'OPE



## Catherine GALY

Cheffe du Service Observatoire Pérenne de l'Environnement,  
Direction de la Recherche et Développement

En matière d'environnement, la demande sociétale tend vers une prise en compte de plus en plus importante des enjeux de la préservation des équilibres écologiques. Pour tous les projets industriels mais a fortiori pour un projet de la nature et de l'envergure de Cigéo, l'élaboration d'une étude d'impact demande un extraordinaire effort d'observation, d'inventaire et d'analyse de l'environnement dans toutes ses complexités.

Nous avons à l'Andra à notre disposition un observatoire assez unique sur le plan national, l'OPE, et une équipe d'ingénieurs et techniciens motivés pour valoriser, pour le projet Cigéo et le territoire, le potentiel de notre observatoire. C'est l'essence même de l'OPE que d'être capable,

avec ses partenaires, d'anticiper les besoins réglementaires futurs en matière d'observation et ou d'analyses environnementales. Même si on aurait sûrement aimé avoir un peu plus de recul pour affiner notre contribution à l'étude d'impact du dossier de DUP sur les interrelations entre les milieux, le travail de réflexion réalisé par l'équipe en 2018-2019 sur la thématique des services écosystémiques, nous permet dès aujourd'hui de répondre aux besoins des dossiers réglementaires pour Cigéo.

L'OPE doit ainsi continuer à évoluer, au travers notamment de son réseau de collaborations et de partenariats et en imaginant de nouveaux modes de gouvernance.

Bien que le champ de recherche sur les services écosystémiques soit encore en évolution, la réglementation s'est néanmoins emparée de ce concept de service écosystémique (SE) et incite à l'intégrer dans les études d'impact. Les réflexions et premiers travaux de l'équipe OPE de la Direction de la Recherche et Développement sur les services écosystémiques a permis de répondre aux besoins de l'étude d'impact de la DUP du projet Cigéo, concernant les interrelations entre les milieux, en présentant le concept de SE et sa déclinaison sur le territoire.

En parallèle, l'OPE a fourni pour l'étude d'impact nombre de données environnementales sur la qualité des milieux physique (air, eau, sol), naturel (biodiversité) et humain (pratiques agricoles).



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

### **Détermination des aléas climatiques extrêmes dans le cadre des analyses de sûreté des installations nucléaires de base en conception, en exploitation et en surveillance**

Suite à l'accident de Fukushima, l'association des autorités de sûreté nucléaires d'Europe de l'Ouest (WENRA) a publié des recommandations relatives aux évaluations de sûreté des installations nucléaires. Ces recommandations établissent que les risques naturels (géologiques, sismiques, météorologiques, hydrologiques, biologiques et feux de forêt) qui peuvent affecter un site doivent être identifiés et caractérisés. Des cas de charges (effets typiques d'un événement sur les ouvrages) doivent être définis avec des niveaux d'aléa et des fréquences ou périodes de retour associées.

L'ASN, avec le soutien de l'IRSN, a mis en place un ensemble de groupes de travail dans l'objectif d'établir des recommandations et des méthodologies destinées aux opérateurs nucléaires afin d'harmoniser leurs approches dans le cadre de leurs analyses de sûreté. Un GT « Agression externe » traite des agressions externes de façon générale en vue d'améliorer la cohérence de leur prise en compte dans la démonstration de sûreté de futures installations nucléaires de base (INB). Depuis Septembre 2019, un autre GT « Neige et vent » a été créé avec deux sous-groupes portant respectivement sur les phénomènes météorologiques et sur les effets sur les structures. Ces GT doivent déboucher sur la publication de guides méthodologiques dans le même esprit que le guide de l'ASN n° 13 concernant le risque Inondation.

Témoignage  
Sébastien  
CONIL



## Sébastien CONIL

Ingénieur Observatoire Pérenne de L'Environnement, Service Observatoire Pérenne de L'Environnement, Direction de la Recherche et Développement

La participation à ces GT permet à l'Andra de contribuer à la définition des méthodologies communes pour l'évaluation de ces risques externes et de confronter les points de vue des différents opérateurs du nucléaire français. Au sein du paysage nucléaire français, le projet Cigéo est particulier car sa période d'exploitation et de surveillance post-fermeture doit dépasser 100 ans. L'IRSN a ainsi demandé que l'évaluation des risques naturels météorologiques et climatiques prenne en compte le changement climatique sur cette échelle d'une centaine d'années. Une analyse bibliographique de l'état des connaissances sur l'évolution des aléas climatiques prenant en compte les prévisions d'évolution du changement climatique a ainsi été réalisée au sein de la Direction de la Recherche et Développement. Cette méta-analyse s'est concrétisée dans un rapport de synthèse illustrant les effets des changements climatiques sur les précipitations extrêmes, les températures

extrêmes et les vents extrêmes en France, avec les incertitudes associées.

Les connaissances sur ces sujets évoluent rapidement depuis une trentaine d'années notamment dans le cadre du cycle des productions des rapports du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat de l'ONU. Ces évolutions touchent autant les connaissances des processus climatiques fondamentaux, les méthodes numériques et les outils informatiques que les scénarios socio-économiques ou les méthodes de régionalisation et d'estimations des impacts. Ce sont des sujets complexes dont le rapport fournit une image à un instant donné. Ce travail doit fournir à l'Andra des éléments pour définir sa doctrine et renforcer ses démonstrations de sûreté, en illustrant notamment les différentes incertitudes existantes.

## MATÉRIAUX INNOVANTS POUR LE STOCKAGE

Témoignage  
Colin  
DUPUY

### Développement d'une formulation de liant géopolymère injectable dans l'espace annulaire de l'alvéole HA à partir d'argilite du Callovo-Oxfordien excavée

L'argilite du Callovo-Oxfordien est principalement composée de minéraux argileux (40 % en moyenne) et de minéraux secondaires, des carbonates et du quartz. Des travaux menés en 2017 ont montré que cette composition minérale est compatible avec la synthèse de matériaux alcali-activés de type géopolymères via la substitution partielle d'une source minérale aluminosilicate classique par de l'argilite. L'application finale visée est le développement d'un liant alcalinement activé, pouvant constituer le matériau de remplissage entre le chemisage des alvéoles de déchets HA et la roche. La formulation et le contrôle de la prise de ces liants argilites-géopolymères, de valeur de pH légèrement basique, ont fait l'objet des études menées dans le cadre de la thèse de Colin Dupuy en 2018, en collaboration avec le laboratoire IRCER (Institut de Recherche sur les Céramiques) de l'université de Limoges.

L'utilisation de ce nouveau matériau comme liant injectable dans l'espace annulaire de l'alvéole HA entre le Callovo-Oxfordien et le chemisage, implique le respect d'un cahier des charges strict : faible viscosité (0,5-5 Pa/s), durée pratique d'utilisation (DPU) élevée (> 24 heures) et valeur de pH après consolidation de l'ordre de 10-11. Afin de répondre à ces critères, une étude a tout d'abord été menée sur la fonctionnalisation de l'argilite par traitement thermique, la faisabilité de matériaux alcali-activés à base d'argilite puis la formulation du coulis. La calcination de l'argilite, indispensable à l'activation alcaline, conduit à la décomposition des carbonates (calcite) et à la formation d'une quantité de chaux, réactive, conduisant à une consolidation très rapide (< 1 heure). Il a ainsi été démontré qu'il était possible d'obtenir des matériaux consoli-

dés à base d'argilite du Callovo-Oxfordien calcinée, présentant de bonnes résistances mécaniques, une tenue à l'eau et une résistance au feu à 800 °C. L'optimisation de la température de calcination permet d'augmenter la durée pratique d'utilisation du liant jusqu'à environ 6 heures. Pour atteindre la DPU visée, il s'est avéré nécessaire de substituer une partie de l'argilite calcinée par de l'argilite crue ou par des additifs minéraux. Enfin, l'utilisation d'additifs (minéral acide) et/ou de métakaolin est indispensable afin de réduire les valeurs de pH des échantillons alcalinement activés jusqu'à 11,1.

Colin Dupuy a soutenu sa thèse à l'université de Limoges le 20 septembre 2019. Ses travaux ont fait l'objet de sept publications. Les prochaines étapes consisteront à caractériser les propriétés physico-chimiques de ce nouveau liant géopolymère sur le long terme et ses interactions avec les autres matériaux du stockage puis à le développer à plus grande échelle pour envisager des tests d'injection à l'échelle des alvéoles HA.



Argilites crues



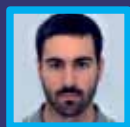
Argilites calcinées (650 °C)



Géopolymère à base d'argilites



Interface géopolymère bloc d'argilites



## Colin DUPUY

Doctorant Andra-IRCER, Service Colis et Matériaux,  
Direction de la Recherche et Développement

La construction et l'exploitation progressives de Cigéo vont entraîner l'excavation progressive de millions de tonnes d'argilite du Callovo-Oxfordien. Un des objectifs de l'Andra est donc l'identification de pistes de valorisation de cette argilite, au sein du projet Cigéo lui-même, notamment comme matériau de remblai ou de scellements, voire d'autres applications. C'est dans le but d'identifier ces pistes de réemploi et d'ouvrir ainsi des voies d'optimisation pour Cigéo, que s'inscrit ma thèse. La formulation de liants de type géopolymères à base d'argilite comme matériau de remplissage à l'extrados du chemisage des alvéoles HA est une première étape franchie. Les géopolymères sont synthétisés par activation alcaline d'une source aluminosilicatée : classiquement, des métakaolins

(kaolins calcinés), privilégiés pour leur pureté et leur réactivité. Ici, il fallait partir de sources minérales moins pures, telles que les minéraux argileux.

La première étape a donc consisté à traiter mécaniquement et thermiquement l'argilite du Callovo-Oxfordien afin d'accroître sa réactivité, puis à la mélanger avec une solution alcaline silicatée, pour démontrer la faisabilité de la géopolymérisation. La seconde étape a permis d'ajuster la formulation, via l'ajout de métakaolin et d'un additif minéral, pour obtenir un liant injectable, répondant au cahier des charges du matériau en extrados du chemisage des alvéoles HA, notamment en termes de pH et de durée pratique d'utilisation (DPU).

## PROJET FA-VL

Finalisation des travaux de consolidation des connaissances scientifiques acquises menés depuis 2015 en réponse aux enjeux identifiés lors de l'instruction du rapport d'étape remis au Gouvernement sur l'implantation d'un troisième centre de stockage dans l'Aube.

### LE MILIEU GÉOLOGIQUE

Témoignage  
Jean-Charles  
ROBINET

#### Finalisation de la campagne d'investigations de terrain

Depuis 2013, l'Andra mène des investigations géologiques dans le département de l'Aube sur la communauté de communes de Vendevre-Soulaines pour évaluer la faisabilité d'y implanter un troisième centre de stockage destiné à accueillir des déchets FA-VL ainsi que des déchets TFA.

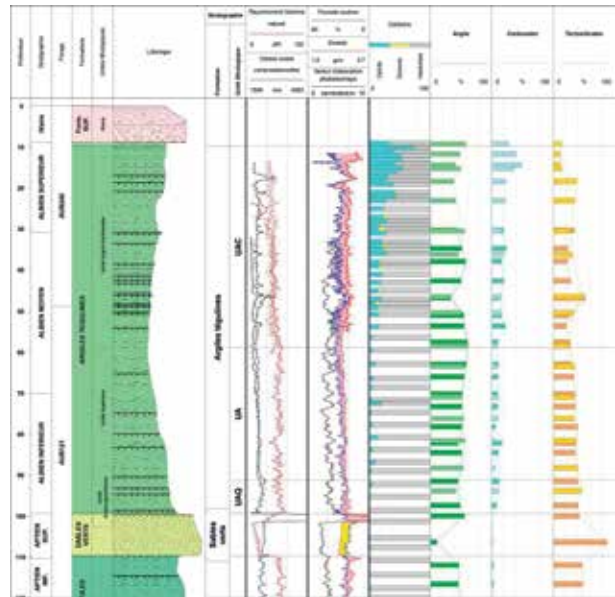
Après une phase initiale d'investigations de 2013 à 2015 conduite sur une zone de 50 km<sup>2</sup>, les investigations géologiques ont repris en 2016 sur une zone restreinte de 10 km<sup>2</sup>, au nord du secteur initial. Le programme d'études avait pour objectifs de consolider les connaissances de terrain (géologie, géomorphologie, géochimie...) sur la formation des argiles tégulines de l'Albien, envisagée comme formation hôte.

Les travaux de terrain se sont achevés fin 2018, ils ont compris notamment la réalisation de 4 forages carottés profonds (< 100 m), une série de tranchées exploratoires de 5 m et une campagne géophysique de surface. Lors de cette campagne, plusieurs centaines d'échantillons de roches et de sols ont été collectés et envoyés dans des laboratoires d'études et de recherche. L'analyse intégrée de l'ensemble des données de terrain, de diagraphies et sur échantillons a permis de :

- confirmer la géométrie de la formation des argiles tégulines de l'Albien et l'homogénéité des faciès argileux en transition via un terme carbonaté avec les marnes de Brienne sus-jacentes ;

- mieux comprendre le fonctionnement hydrogéochimique de la zone d'interface d'une dizaine de mètres entre les argiles tégulines et le sol ;
- préciser l'évolution géomorphologique du site sur les derniers 500 000 ans.

Ces nouvelles connaissances de site ont permis de disposer d'une compréhension globale du système géologique des Argiles tégulines et de ses encaissants à l'actuel, en lien avec son environnement de surface.



Découpage lithologique de la formation des argiles tégulines à partir de l'analyse lithologique, des diagraphies et de la composition minéralogique



## Jean-Charles ROBINET

Chef du Service Transferts, Direction de la Recherche et Développement

La phase d'investigations de terrain sur la communauté de communes de Vendevre-Soulaines commencée en 2016, focalisée sur les argiles tégulines et leur environnement de surface sur la zone restreinte, s'est achevée en 2018. L'étude d'une formation géologique affleurante telle que celle des argiles tégulines a impliqué de mobiliser des moyens d'investigations adaptés, en comparaison de ceux mis en œuvre sur la formation profonde du Callovo-Oxfordien en Meuse/Haute-Marne pour le

projet Cigéo. Un ensemble de tranchées exploratoires jusqu'à 5 m de profondeur, inédites en termes de méthodologie à l'Andra, ont ainsi été creusées. Ces investigations nous ont permis de recueillir des informations complémentaires sur les argiles tégulines et leur interface avec le sol. Les données obtenues nous permettront de mieux comprendre l'évolution du site sur les dernières centaines de milliers d'années, pour évaluer son évolution future.

## UNE R&D INNOVANTE SUR LE TRAITEMENT/ CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS EN AMONT DES STOCKAGES

« Témoignages  
Frédérique  
GAUTIER  
Sébastien  
FARIN

### Avancement des projets du Programme d'investissements d'avenir (PIA)

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. Cet appel à projets visait à mobiliser largement autour de ces sujets, et au-delà du seul secteur nucléaire, les acteurs de la recherche et développement – laboratoires de recherche, PME et grands groupes. Près d'une centaine de projets ont été soumis, dont 29 projets sont aujourd'hui soutenus. Parmi eux,



Photographie de la journée dédiée aux projets du Programme d'investissements d'avenir organisée par l'Andra



## Frédérique GAUTIER

Coordinatrice administrative  
des projets PIA à l'Andra,  
Secrétariat Général

Nous soutenons au total 5 projets autour de la thématique du recyclage et de la valorisation des déchets radioactifs, avec des applications assez diverses : recyclage des gravats (projet CYBER), recyclage des métaux contenus dans les câbles contaminés (projet ORCADE), mais aussi recyclage de certains radio-isotopes en vue de leur valorisation comme le tritium (projet VALOFUSION) ou l'américium (projet RTG), ainsi qu'un projet apportant le point de vue des sciences humaines et sociales sur le recyclage (projet METROPOLITIN). Un 6<sup>e</sup> projet portant sur le recyclage des déchets métalliques (projet Val'M) pourrait être contractualisé prochainement. Au cours de l'année 2018, deux de ces projets – ORCADE et CYBER – ont exposé l'état d'avancement de leurs travaux aux membres de la Commission nationale d'évaluation (CNE) dans le cadre des auditions relatives à la gestion des déchets TFA. Il s'agissait avant tout de présenter à la CNE ces nouvelles initiatives en matière de recyclage, ainsi que les procédés innovants développés afin de décontaminer les gravats (CYBER) et d'isoler, sans transfert de contamination, les métaux contenus dans les câbles contaminés TFA (ORCADE). Le procédé CYBER, basé sur un traitement micro-ondes des gravats, a été testé sur un pilote à grande échelle, et des essais sur de véritables gravats TFA vont prochainement être menés. Pour le projet ORCADE, une maquette de dénudage des câbles contaminés a été développée et testée avec succès et fin 2019, le procédé a fait l'objet d'un dépôt de brevet. Dans les deux cas, des évaluations économiques et environnementales (analyse de cycle de vie) sont en cours. Les membres de la CNE se sont montrés très attentifs à ces initiatives et il sera donc intéressant de revenir vers eux à l'horizon 2020, avec les résultats de ces deux projets.



## Sébastien FARIN

Directeur Dialogues et Prospective, en charge de la coordination  
de l'innovation à l'Andra

L'Andra et l'Agence nationale de la recherche (ANR) ont organisé le mardi 15 octobre 2019 une journée d'échanges et de présentation consacrée à l'innovation en matière de gestion des déchets radioactifs de démantèlement, à destination de la communauté scientifique et industrielle. Cette journée a non seulement mis en lumière l'avancement des projets soutenus dans le cadre du PIA, mais elle a surtout laissé une large part aux échanges entre participants via des espaces projet dédiés. Elle a été ponctuée par des sessions thématiques et des démonstrations des technologies développées.

Près de 400 personnes ont assisté à cette journée et les projets relatifs au recyclage des déchets TFA ont suscité beaucoup de questions et d'intérêt tant des scientifiques que des industriels. Ces projets ont par ailleurs été retenus pour une présentation lors de la conférence internationale Waste Management de 2020, réunissant chaque année aux États-Unis une trentaine de pays et plus de 2 500 visiteurs tant scientifiques qu'industriels pendant quatre jours, offrant ainsi une opportunité de rayonnement privilégiée pour les travaux de l'Agence et toutes les entreprises associées.



## RELATIONS INTERNATIONALES

la thématique du recyclage des déchets radioactifs présente un intérêt particulier. Il s'agit en effet d'une thématique pour laquelle le soutien apporté par l'Andra dans le cadre du PIA a eu un effet incitatif fort, d'une part pour faire émerger des initiatives innovantes dans ce domaine pour lequel l'acceptation réglementaire et sociétale n'est pas acquise, et, d'autre part, pour ouvrir la R&D à de nouveaux acteurs, en particulier des industriels spécialisés dans la gestion des déchets conventionnels. La question du recyclage des déchets TFA est largement sujette à débat ; elle a fait l'objet de plusieurs rapports dans le cadre du PNGMDR et d'un groupe de travail du Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) entre 2016 et 2019 (rapport publié en avril 2020) ; elle a par ailleurs pris une place significative dans le débat public PNGMDR de 2019. Dans le cadre des projets PIA, l'Andra a ainsi souhaité apporter des éléments concrets sur ce sujet, en étudiant la faisabilité technique du recyclage, et pour les projets les plus matures, en apportant une première évaluation de l'équilibre économique de ces filières de gestion.



Photographie de la journée dédiée aux projets du Programme d'investissements d'avenir organisée par l'Andra

### Collaboration avec l'East China University of Technology (ECUT)

En 2018, l'Andra a établi un accord de collaboration avec l'East China University of Technology (ECUT) qui est, en Chine, l'organisme en charge de l'étude d'un projet de stockage géologique profond en milieu argileux pour les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Plusieurs sites sont à l'étude et des travaux de reconnaissance géologique ont été menés à Tamusu, dans le désert de Mongolie intérieure. Dans le cadre de cet accord, l'Andra a pour mission de former et conseiller les scientifiques de l'ECUT sur les modalités spécifiques de mise en œuvre des programmes de reconnaissance géologique nécessaires pour la qualification d'un site de stockage.



Xingfu Jiang, professeur spécialisé en géologie structurale, a ainsi rejoint mi-2018 les géologues de la Direction de la Recherche et Développement durant un an, pour étudier les outils et méthodes de reconnaissance comme les techniques de foration, le conditionnement des échantillons, le choix des méthodes géophysiques, etc. Xingfu a pu participer au suivi des travaux de reconnaissance menés dans l'Aube pour le projet de stockage de déchets faible activité vie longue (FA-VL), mais également aux travaux de suivi géologique réalisés dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Il a ensuite pu mettre en application les connaissances acquises en réalisant des analyses sur des échantillons du site étudié en Chine. Durant cette année, Xingfu Jiang a également eu l'opportunité de rencontrer certains des partenaires scientifiques travaillant avec l'Andra.

D'autres scientifiques de l'ECUT sont venus au cours de l'année 2019, pour des missions plus courtes, afin de rencontrer, en fonction de leur spécialité, les experts de l'Andra. C'est le cas de deux maîtres de conférences, Qunli Zhang et Houfa Du, venus se familiariser aux méthodes d'observation, d'études géologiques et de mesures en hydrogéologie dans les forages et les galeries du Laboratoire souterrain.



Photographie de Madame Qunli Zhang et Monsieur Houfa Du à l'entrée du tunnel de Demange-aux-Eaux

### Rencontre avec le BRIUG : Workshop on Planning and Design of Field Experiments in the Underground Research Laboratory

Du 20 au 23 mai 2019, à l'initiative du Beijing Research Institute of Uranium Geology (BRIUG), l'Andra a participé en tant qu'expert au workshop dédié à la préparation et la programmation des études de caractérisation à réaliser pendant la construction du Beishan Experimental Tunnel (BET), dont le dossier d'autorisation de création a été approuvé par le gouvernement chinois le 16 avril 2019. Ce futur Laboratoire souterrain pourra être étendu en stockage si l'autorisation en est donnée.

Ce workshop a rassemblé une trentaine de participants, avec huit experts internationaux (trois Finlandais, trois Suédois, un Allemand et un Français). Le BRIUG a présenté la conception générale du projet BET et les aspects techniques du programme scientifique de suivi de sa construction. Les experts ont alors partagé leurs recommandations sur la base de leur propre retour d'expérience de programmation stratégique des activités de R&D lors du creusement d'un laboratoire souterrain de recherche ou d'un stockage.

La conception du BET est inspirée principalement de l'expérience des Suédois et des Finlandais, dont la roche est de nature proche (formation granitique). Il doit comporter :

- un puits de 6 m de diamètre pour le personnel et le matériel, prévu d'être foré en utilisant la technique de « foration-tir ». Une technique de tunnelier vertical, qui pourrait permettre d'atteindre théoriquement une vitesse de 300 m par mois, est à l'étude ;
- deux puits de 3 m de diamètre pour la ventilation, foncés en *raise boring* ;
- une rampe de 7 m de diamètre excavée par un tunnelier (TBM) sur une longueur de 7,860 km.



Photographie du groupe d'experts et participants au Workshop on Planning and Design of Field Experiments in the Underground Research Laboratory

↳ Témoignage  
Sophie  
BERNARD

## Une technicienne de l'Andra en mission scientifique à Fukushima

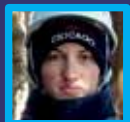
Dans le cadre du projet de recherche AMORAD (Amélioration des modèles de prévision de la dispersion et d'évaluation de l'impact des radionucléides au sein de l'environnement), Sophie Bernard, technicienne à l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) de la Direction de la Recherche et Développement a effectué une mission de dix jours en forêt à une trentaine de kilomètres de Fukushima, en novembre 2018.

Coordonné par l'IRSN et soutenu par l'ANR, le projet international AMORAD CONTI, qui vise à améliorer les méthodes scientifiques permettant d'évaluer les conséquences d'un rejet de substances radioactives dans l'environnement, a démarré fin 2013 pour une durée de six ans. Il rassemble 13 partenaires dont l'université de Tsukuba au Japon et l'Andra, qui coordonne l'axe consacré au transport et au devenir des éléments radioactifs en milieu forestier.

Comment les éléments radioactifs sont-ils interceptés puis incorporés dans les forêts ? Comment y circulent-ils ? Pour répondre à ces questions, les scientifiques s'appuient sur le cas de Fukushima où des substances radioactives ont été rejetées suite à l'accident survenu en 2011. C'est dans ce cadre que l'Andra apporte ses compétences en radioécologie et en prélèvement d'échantillons environnementaux et participe, pour la quatrième année consécutive, à une campagne de prélèvements. Ces mesures régulières permettent de reconstituer le cycle du césium dans les arbres, qui passe des feuilles au sol, puis retourne en partie dans le tronc via les racines pour alimenter à nouveau les feuilles, etc. Grâce aux techniques d'échantillonnage, les variations liées aux espèces, à la masse de feuilles présentes au moment des retombées, à la taille des arbres sont étudiées et permettent de mieux comprendre le devenir d'une contamination des forêts sur le long terme.



Photographies lors du prélèvement d'échantillons environnementaux en milieu forestier à proximité de Fukushima



## Sophie BERNARD

Technicienne Gestion des échantillons à l'Observatoire Pérenne de l'Environnement, Direction de la Recherche et Développement

C'est une chance extraordinaire que de participer à un tel projet sur le terrain, d'apprendre des techniques spécifiques de prélèvements d'échantillons environnementaux, mais aussi de montrer les compétences de l'Andra dans ce domaine et ce que nous faisons à l'OPE :

Lors de cette mission, une trentaine de chênes, de châtaigniers et de cèdres du Japon ont été sélectionnés et coupés par les agents forestiers. Je les mesurais puis j'identifiais les portions de l'arbre qui devaient être coupées afin d'en extraire des disques de tronc à différentes hauteurs, représentatifs de leur croissance.

Les branches, les feuilles, les bourgeons ainsi que les racines ont également été échantillonnées en respectant des protocoles rigoureux. Je les ai ainsi triés, coupés, décortiqués en petits morceaux puis identifiés afin de pouvoir les mettre en sachets. Ensuite nous les avons transportés jusqu'à la faculté de Fukushima pour les faire sécher et les broyer. Les teneurs en  $^{137}\text{Cs}$  sont ensuite analysées par l'IRSN à Cadarache. Les protocoles et les paysages étaient bien sûr différents mais, fondamentalement, ce travail est très proche de ce que nous faisons au quotidien à l'OPE, et notamment dans son Écothèque pour préserver la mémoire de l'environnement du territoire d'accueil du projet Cigéo.

## 02 L'ANDRA ET LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE



Photographie de la signature du partenariat avec l'université de Lorraine

### PARTENARIATS SCIENTIFIQUES

Avec la signature de 4 nouveaux accords en 2018 et 2019, amenant à un total de 17 ses partenariats de R&D, l'Andra s'appuie toujours fortement sur la communauté scientifique.

#### L'Andra et l'université de Lorraine donnent de nouvelles ambitions à leur partenariat scientifique

Le 10 mai 2019, l'Andra et l'université de Lorraine ont signé un nouveau partenariat pour faire des savoirs, des savoir-faire et des outils de l'Andra et de l'université de Lorraine une opportunité pour le territoire. Depuis plus de 20 ans, l'université de Lorraine est un des partenaires de recherche d'excellence de l'Andra, les travaux menés dans ses laboratoires de géosciences et de sciences de l'environnement ayant fortement contribué à nourrir le socle de connaissances scientifiques et techniques nécessaires au développement des activités de l'agence, et notamment au projet Cigéo. Les nouvelles ambitions de ce partenariat scientifique sont structurées autour de 4 axes :

- développer de nouvelles formations d'intérêts propres ou partagés ;
- mener des recherches communes ;
- mettre en place des outils communs et partagés en matière d'ingénierie et de gestion des connaissances ;
- développer une dynamique environnementale innovante au service du territoire de Meuse/Haute-Marne.



Photographie de la signature du partenariat avec RTE

Avec cet accord, l'Andra et l'université de Lorraine vont explorer non seulement des thématiques scientifiques nouvelles, au-delà du domaine historique des géosciences, mais également mettre en synergie leurs compétences et outils sur des sujets très différents. Ainsi, les outils de recherche de l'Andra en Meuse/Haute-Marne (Laboratoire souterrain, Observatoire Pérenne de l'Environnement) seront un atout majeur dans la construction de ce partenariat élargi.

#### L'Andra et RTE signent un accord de partenariat pour partager leurs connaissances en matière de surveillance des ouvrages en béton

Pour répondre à leurs enjeux communs de maintenance et de durabilité des ouvrages en béton, l'Andra et RTE (Réseau de transport d'électricité) ont signé le 11 avril 2018 un accord de partenariat de R&D pour une durée de 5 ans. Il marque la volonté des deux acteurs de partager leurs connaissances en matière de suivi innovant des ouvrages, notamment l'utilisation de fibres optiques, pour surveiller le vieillissement des massifs en béton des lignes à haute tension pour RTE et des ouvrages de stockage en béton pour l'Andra.

Les premiers travaux communs porteront, d'une part, sur l'évaluation des performances métrologiques des capteurs de mesure de température et de déformation au sein des structures, et, d'autre part, sur l'instrumentation de fondations de pylônes en béton, via des capteurs à transmission sans fil, développés par chacun des partenaires (fibre optique pour RTE et extensomètre pour l'Andra).

» Témoignage  
Éric  
HEINTZÉ

### L'Andra et l'IFPEN signent un accord de collaboration scientifique pour monter des projets communs autour du stockage géologique

Faisant suite à 20 ans de collaboration, l'IFP Énergies nouvelles (IFPEN) et l'Andra ont signé le 2 mai 2018 un accord-cadre de partenariat scientifique, qui matérialise leur volonté de partager leurs expertises autour de thématiques de recherche communes, en lien avec le stockage géologique : Cigéo pour l'Andra et le stockage du CO<sub>2</sub> pour l'IFPEN.



Photographie de la signature du partenariat avec l'IFPEN

Cette collaboration se déclinera suivant 4 axes : modélisation géologique, monitoring, instrumentation et analyse, simulation numérique et corrosion des aciers, d'où ont émergé dès 2019 des projets communs.

### L'Andra et l'Inria renouvellent leur partenariat autour de la simulation numérique

Déjà associés depuis plus de 10 ans pour développer des méthodes et des outils numériques capables de simuler l'évolution des stockages et de leur environnement géologique sur de très longues échelles de temps, l'Andra et l'Inria ont renouvelé leur partenariat le 30 mai 2018.



Photographie de la signature du partenariat avec l'Inria

Si la simulation numérique reste au cœur du partenariat, avec l'amélioration de la représentation multi-physique des stockages via des méthodes et des outils numériques robustes, rapides, précis et performants, il s'ouvre aussi à d'autres sujets, comme les approches multi-échelles, la gestion de grandes masses de données hétérogènes (big data, data mining), les outils de réalité virtuelle ou encore la visualisation haute performance.



## Éric HEINTZÉ

Directeur Scientifique de l'IFP Énergies nouvelles

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.

Dans le cadre de la mission d'intérêt général confiée par les pouvoirs publics, IFPEN concentre ses efforts sur :

- l'apport de solutions aux défis sociétaux de l'énergie et du climat, en favorisant la transition vers une mobilité durable et l'émergence d'un mix énergétique plus diversifié ;
- la création de richesse et d'emplois, en soutenant l'activité économique française et européenne ainsi que la compétitivité des filières industrielles associées.

Partenaires depuis une vingtaine d'années, l'Andra et IFPEN ont signé en mai 2018 un accord-cadre de collaboration, marquant ainsi notre volonté d'allier nos compétences pour progresser ensemble et lever les verrous scientifiques majeurs relatifs à nos thématiques communes de recherche. Les objectifs de notre feuille de route sont les suivants : améliorer notre capacité à modéliser les milieux géologiques et leurs écoulements de fluides aux différentes échelles requises ; renforcer notre capacité de

monitoring des stockages géologiques afin de répondre aux objectifs de sécurité concernant notamment les transferts de gaz ; affiner par simulation numérique la compréhension des processus physico-chimiques fortement couplés, impliqués dans la subsurface à différentes échelles spatio-temporelles ; accroître notre capacité à évaluer et maîtriser les risques de corrosion des aciers.

Nos travaux de recherche, qui s'échelonnent sur différents TRL, sont réalisés dans le cadre de stages postdoctoraux et de thèses ou encore d'études conjointes. Les échanges constructifs, issus de notre dernier Comité de pilotage, témoignent de la très bonne dynamique mise en œuvre au sein des équipes de recherche et d'une réelle complémentarité de nos deux organismes sur les thématiques identifiées.

J'ai toute confiance, pour les années à venir, sur le devenir de ce cadre partenarial qui devrait également s'ouvrir prochainement afin de répondre conjointement à des appels à projets de recherche nationaux et/ou européens.



## Jean-Bernard KAZMIERCZAK

Ineris, Direction des Risques  
du Sol et du Sous-Sol, DRSG,  
Délégué Scientifique

Le 26 novembre 2018, l'Andra et l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) ont signé un nouvel accord de partenariat pour cinq ans. Il prolonge une collaboration scientifique entamée en 2001. Ces 17 années de travaux communs ont eu pour but essentiel de développer les connaissances sur la maîtrise des risques liés notamment aux ouvrages souterrains. Ces études scientifiques ont ainsi porté sur le comportement mécanique à long terme des ouvrages souterrains pour comprendre, par exemple, comment la roche argileuse, au cœur de laquelle est installé le laboratoire de l'Andra, se déforme sous l'effet du creusement des galeries puis dans le temps. C'est une connaissance indispensable pour le développement des modèles de comportement numériques dédiés au dimensionnement des ouvrages souterrains de Cigéo, et la maîtrise de leur tenue sur la durée d'exploitation séculaire de Cigéo. Des outils et modèles ont également pu être améliorés et validés en s'appuyant sur différentes expérimentations et instrumentations réalisées collectivement.

Dans la perspective du dépôt du dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo, les travaux communs abordent aujourd'hui de nouvelles thématiques liées à la gestion des risques en exploitation – telles que la maîtrise des risques d'incendie ou d'explosion – ou encore la réduction des impacts sanitaires et environnementaux des centres de stockage de l'Andra.

Ce nouvel accord prévoit également des collaborations en matière de valorisation scientifique et de dialogue. Pluridisciplinaire, s'appuyant sur un laboratoire souterrain unique en son genre et 17 ans de données et recherches accumulées, le partenariat entre l'Andra et l'Ineris continue à faire avancer la science sur un même projet d'intérêt général.



## Pierre TOULHOAT

Directeur Scientifique du BRGM

Le partenariat entre l'Andra et le BRGM a plus de 20 ans. Avant même la signature d'un accord de partenariat en 1998, le BRGM et l'Andra avaient travaillé ensemble sur la géologie des formations susceptibles d'abriter un jour un stockage de déchets nucléaires. À partir de 1998, la collaboration s'est focalisée sur la géochimie, les propriétés de confinement des argillites, l'influence des barrières ouvragées et leur évolution à long terme en champ proche. Des réponses à des questions scientifiques importantes ont été apportées : chimie des eaux porales dans les argillites, propriétés de transport et rétention des argillites vis-à-vis des actinides et produits de fission à vie longue, influence de la température, effets de la dégradation de composants en béton. Elles ont donné lieu à de nombreuses publications scientifiques de référence, et significativement renforcé les dossiers scientifiques et techniques soumis par l'Andra aux autorités en vue de la construction d'un stockage (projet Cigéo).

### L'Andra et l'Ineris reconduisent leur collaboration pour renforcer leurs connaissances sur le comportement des ouvrages souterrains

Témoignage  
Jean-Bernard  
KAZMIERCZAK

Depuis 17 ans, l'Andra et l'Ineris collaborent sur des projets de recherche communs, partageant leurs expertises respectives en termes de méthodologies, d'expérimentations et de connaissances scientifiques. Le 26 novembre 2018, ils ont renouvelé leur accord de partenariat pour renforcer leurs connaissances sur les phénomènes à l'œuvre dans le stockage, la surveillance des installations et de l'environnement et la prévention des risques.

### L'Andra et le BRGM étendent leur collaboration scientifique au-delà des géosciences

Témoignage  
Pierre  
TOULHOAT

Le 12 novembre 2018, à l'issue d'une journée d'échanges scientifiques célébrant les 20 ans de partenariat entre les 2 organismes, l'Andra et le BRGM ont signé un nouvel accord de partenariat, dont les axes de R&D majeurs seront directement en lien avec l'avancée de Cigéo. Aux domaines de collaboration historiques autour des géosciences (géologie, hydrogéologie,



Photographie de la signature du partenariat avec le BRGM

Renouvelé depuis le 12 novembre 2018, l'accord de collaboration se focalisera sur 4 thèmes :

- affiner la compréhension des processus géochimiques de confinement et perfectionner les modèles numériques les représentant ;
- poursuivre les collaborations historiques en matière de géologie, d'hydrogéologie et de géophysique, pour Cigéo mais aussi en accompagnement d'autres projets de l'Andra ;
- avancer en matière d'instrumentation, de gestion des systèmes d'information et de surveillance des ouvrages et de leur environnement proche ou lointain ;
- développer la simulation numérique pour représenter l'évolution des stockages en interaction avec leur environnement, sur de grandes échelles de temps et d'espace ; allant jusqu'au défi de créer un « jumeau numérique » de Cigéo.

géophysique, géochimie et transferts), viennent se rajouter ceux du monitoring (instrumentation, systèmes d'information et data mining) ainsi que la simulation numérique aux grandes échelles (temps et espace).

► Témoignage  
Céline  
RIGHINI-WAZ

### L'Andra et l'IGN signent un accord de collaboration scientifique dans le domaine de l'information géographique

Le 28 janvier 2019, l'Andra et l'IGN, Institut national de l'information géographique et forestière, ont signé un accord de collaboration scientifique pour 4 ans afin de mettre en synergie leurs besoins et leurs savoir-faire dans le domaine de l'information géographique, notamment sur leurs thématiques d'intérêt commun que sont : la cartographie, la visualisation 3D et l'analyse d'image aérienne. Plusieurs projets de collaboration ont été identifiés et seront mis en place dans les années à venir : l'analyse de l'évolution du paysage sur le territoire autour du Centre de Meuse/Haute-Marne pour détecter les changements paysagers et d'occupation du sol, le suivi de la déformation des terrains en surface dont les couvertures des



Photographie de la réalisation de la campagne de prises de vues dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne par les équipes de l'IGN

centres de stockage grâce à des moyens de mesures aéroportés, la modélisation 3D du Laboratoire souterrain et ses expérimentations et la faisabilité du suivi des déformations de ses galeries par relevés photogrammétriques.

### L'Andra, le CEA et la R&D d'EDF signent un accord de partenariat de recherche dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs

Le 17 juillet 2019, l'Andra, le CEA et la R&D d'EDF ont signé un accord de partenariat de recherche d'une durée de 5 ans, marquant leur volonté de poursuivre leur effort de R&D sur le long terme et de formaliser des collaborations tripartites, en particulier autour du projet de stockage géologique profond Cigéo. Les trois organismes ont ainsi identifié six grandes thématiques de R&D : la caractérisation, le conditionnement et le comportement des déchets radioactifs et des combustibles usés, le comportement des matériaux des stockages, le transfert des éléments radioactifs et des toxiques chimiques, les outils de surveillance des stockages, les outils et méthodes numériques et l'environnement (modèles d'évaluation de l'impact environnemental et évolutions climatiques).

### Signature de l'accord tripartite Andra/Ondraf-Niras/RWM du consortium ThermoChimie



En juin 2018, le consortium ThermoChimie a intégré l'agence belge de gestion des déchets radioactifs, Ondraf/Niras. L'accord

de collaboration tripartite entre l'Andra, RWM (Radioactive Waste Management, UK) et Ondraf-Niras a été signé pour poursuivre le développement de la base de données thermo-chimiques sur une durée de 5 ans (2018-2023). Ainsi, le consortium ThermoChimie continue son évolution vers une mutualisation des moyens financiers, mais également scientifiques et techniques, à l'échelle européenne pour les agences en charge de la gestion des déchets radioactifs.



## Céline RIGHINI-WAZ

Ingénieure géologue, Service Coordination opérationnelle, Caractérisation et Chaînes de données, Direction de la Recherche et Développement

Dans le cadre de l'accord de collaboration, un accord spécifique a été signé avec l'IGN pour la production d'un modèle 3D des galeries du Laboratoire souterrain, permettant d'y accéder virtuellement. Pour numériser les galeries sans matériel entreposé et éviter ainsi toute « pollution » visuelle de la modélisation finale, la prise de vues a été organisée avant la reprise du creusement du chantier 4, en étroite coordination avec le département technique du Laboratoire souterrain pour déplacer le matériel au fur et à mesure de l'avancement des différentes captations. Ainsi, les trois géomètres de l'IGN ont pu intervenir dans les galeries du Laboratoire du 11 au 15 mars 2019 pour prendre les vues nécessaires à la modélisation. Trois types de mesures ont été acquis : (1) une captation par mesures laser 3D basée sur 109 stations, (2) des prises de vues photogrammétriques acquises par un capteur de type « sac à dos », composé de quatre caméras légères conçues par le laboratoire d'optoélectronique, de métrologie et d'instrumentation (Loemi) de l'IGN, et (3) des relevés

topométriques. La visualisation 3D immersive s'appuie sur le modèle 3D maillé (ou nuage de points) réalisé à l'aide du scanner laser 3D sur lequel sont reprojétées les images couleurs acquises par le capteur d'acquisition photogrammétrique. Les mesures topométriques associées permettent de déterminer des points d'appui communs aux traitements des données photogrammétriques issues des acquisitions « sac à dos » et lasergrammétriques obtenues avec le scanner laser 3D, qui sont ensuite intégrées dans une maquette iTowns (plate-forme technologique développée initialement par l'IGN permettant de visualiser et d'exploiter tous types de données géographiques 3D à travers le Web). Cette maquette 3D nous permettra à terme une visite virtuelle immersive des galeries du Laboratoire souterrain tout en ayant la possibilité de prendre des mesures entre différents objets. L'IGN a pu, grâce à cette opération, faire évoluer ses outils (notamment le « sac à dos » de photogrammétrie).

ThermoChimie, base de données créée et développée par l'Andra depuis 1995, contient un ensemble de données thermodynamiques nécessaires à la modélisation numérique par des codes géochimiques du comportement en solution des radionucléides dans les différents composants des stockages existants ou futurs. Elle est devenue progressivement une référence internationale, utilisée notamment par plusieurs agences en charge de la gestion des déchets radioactifs : RWM (Royaume-Uni), Ondraf/Niras (Belgique), SKB (Suède), Posiva (Finlande).

En octobre 2019, le consortium a organisé deux workshops d'expertise internationale : le premier sur l'élaboration d'exercices de « Benchmark » de la base ThermoChimie, en comparaison avec d'autres bases de données thermodynamiques, et le second sur la caractérisation du « redox » dans les systèmes géochimiques et l'intégration de processus clés déterminants dans les modélisations géochimiques.

ThermoChimie est en constante évolution pour élargir la gamme des conditions auxquelles elle peut être appliquée, et pour à la fois affiner et étendre son domaine d'application. Ainsi, les prochaines versions de la base de données visent à inclure l'effet de la température, une meilleure prise en compte des conditions redox, des ligands organiques et des sels solubles pour permettre une meilleure évaluation de conditions géochimiques au sein des alvéoles de stockage et leurs champs proches.

Les différentes versions de la base de données ThermoChimie (version actuelle v10a) sont disponibles, dans divers formats, sur le site Web [thermochimie-tdb.com](http://thermochimie-tdb.com).

#### **L'Andra adhère au CLORA, le Club des organismes de recherche français à Bruxelles**

Créé en 1991 et implanté à Bruxelles par des organismes de recherche publics français et des universités, le CLORA regroupe actuellement une trentaine de membres, désireux de mettre en commun leurs compétences pour renforcer leurs relations avec l'Union européenne dans les domaines de la recherche, de l'innovation et de l'enseignement supérieur. Souhaitant souligner son positionnement fort dans la recherche européenne et se donner la possibilité de financer des projets collaboratifs via d'autres programmes qu'Euratom, l'Andra a adhéré au CLORA en décembre 2018, rejoignant quelques-uns de ses principaux partenaires (CNRS, CEA, BRGM, Inria, IFPEN, etc.).

#### **L'Andra réunit ses partenaires scientifiques**

Le 13 septembre 2018, l'Andra a réuni ses partenaires scientifiques pour une journée d'échanges sur les nouveaux enjeux de recherche, de développement et d'innovation liés à la gestion des déchets radioactifs et les modalités de co-construction des formes de collaboration qui en découlent. Autour de la table, les directeurs scientifiques du BRGM, du CNRS, de l'INRA, de l'Ineris, de l'IFPEN, de l'université de Lorraine, de l'université de technologie de Troyes, de l'IFSTTAR, de l'IGN, de

l'IMT Atlantique, d'EDF R&D, du CEA R&D, d'ORANO R&D, ainsi qu'un représentant du ministère de la Recherche ont partagé leurs visions sur :

- le développement de savoirs scientifiques « nouveaux » ;
- la mise à disposition des savoirs, savoir-faire et outils scientifiques et technologiques de l'Andra pour ses partenaires ;
- la capitalisation et le maintien des savoirs scientifiques et des compétences ;
- la constitution d'une « team France » regroupant l'Andra et ses partenaires scientifiques pour accompagner les projets de stockage à l'international ;
- et le dialogue avec la société.

La réflexion se poursuivra à l'avenir pour dégager des actions opérationnelles sur les 5 axes identifiés.



*Photographie de la journée d'échanges entre l'Andra et ses partenaires scientifiques*

#### **L'Andra labellisée « Talents INPI » par l'Institut national de la propriété industrielle (INPI)**

Ce label, décerné suite à plusieurs audits, récompense la politique active de propriété intellectuelle (PI) de l'Andra, initiée en 2009 pour protéger, promouvoir et valoriser durablement l'ensemble de ses activités de recherche scientifique et technologique, de conception, de développement, d'ingénierie ainsi que d'exploitation industrielle. Il valorise son approche transverse en matière de PI, ainsi que sa maîtrise de l'ensemble des métiers : veille technologique, protection des innovations, sécurisation contractuelle et défense des intérêts et actifs, gestion des contentieux, formation, jusqu'à la valorisation des titres de PI.

Le portefeuille de l'Andra compte aujourd'hui plus de 80 titres de PI dont majoritairement des brevets (par exemple : funiculaire pour le transport sécurisé des déchets radioactifs, matériaux et vousoirs compressibles pour la construction d'ouvrages), mais également une dizaine de codes sources de logiciels et de bases de données comme Géosciences, ainsi que 6 marques.



## PROJETS EUROPÉENS

► Témoignages  
Marie  
GARCIA  
Mayeul  
PHELIP

### Dépôt et lancement du Programme européen de recherche sur la gestion des déchets radioactifs (EURAD)

Après plus de 3 ans d'efforts, le 27 septembre 2018, l'Andra, au nom d'une centaine d'acteurs européens de la gestion des déchets radioactifs, a déposé auprès de la Commission européenne (CE), un dossier de programme européen conjoint de recherche. L'objectif : rassembler l'ensemble des pays et parties prenantes européens autour d'une même vision stratégique et d'un agenda de recherche commun, afin de mutualiser les efforts de recherche et de partager les connaissances scientifiques et techniques.



Tous les acteurs européens impliqués dans la gestion des déchets radioactifs – agences de gestion des déchets radioactifs, comme l'Andra, supports techniques aux autorités de sûreté, comme l'IRSN, et centres de recherche (CNRS, CEA, BRGM, Inria, université de Lorraine, etc., pour la France), de 23 pays de l'Union européenne ou pays associés, ont ainsi présenté une programmation de recherche intitulée EURAD pour European Joint Programme on Radioactive Waste Management, autour d'une vision stratégique sur le long terme et d'une feuille de route partagée. Les thématiques de recherche communes identifiées portent aussi bien sur les phases « amont » (caractérisation, traitement et conditionnement des déchets) que sur l'entreposage et le stockage, en particulier géologique.



Photographie de la réunion de lancement d'EURAD



### Marie GARCIA

Ingénieure gestion de projets scientifiques, Direction de la Recherche et Développement

La programmation conjointe de recherche EURAD fait suite à un intense travail collectif mené à l'échelle européenne depuis plusieurs années. Tout d'abord, le projet JOPRAD (Joint Programming on Radioactive Waste Disposal, financé dans le cadre du programme Euratom – Horizon 2020), lancé en 2015 et piloté par l'Andra a confirmé la faisabilité d'un programme conjoint de recherche autour de la gestion des déchets radioactifs. À l'issue de cette étude de faisabilité, et dans le cadre du programme Euratom, la CE a lancé un appel pour le dépôt d'un Joint Programme autour de la gestion des déchets radioactifs. Les acteurs européens de la R&D sur la gestion des déchets radioactifs, et plus particulièrement le stockage, se sont fortement mobilisés afin de rédiger les documents fondateurs du programme EURAD (Vision, Agenda de recherche, Roadmap, Gouvernance) et de développer le contenu scientifique et technique de la première phase d'implémentation (2019-2024).



### Mayeul PHELIP

Chargé de mission, Ministère de la transition écologique et solidaire, DGEC, Sous Direction de l'industrie nucléaire, Bureau Politique Publique et Tutelles

Le ministère de la Transition écologique et solidaire, et plus particulièrement la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) supporte fortement le projet et a contribué activement à son élaboration en organisant des réunions régulières de coordination entre les principaux acteurs français participant au projet (Andra, CEA, EDF, ORANO, CNRS et IRSN). Un programme conjoint permet de mutualiser au niveau européen l'effort conséquent de R&D nécessaire au développement de solutions de stockage sûres à un coût acceptable. Ce projet a nécessité au préalable la constitution d'une communauté regroupant l'ensemble des acteurs (WMO, TSO, REs) partageant la même vision stratégique. Le gouvernement, au regard de son propre programme, a tout intérêt à ce que les acteurs européens soient réunis et coordonnés vers des objectifs qui rejoignent les siens, et à ce que la France occupe une position de leader. Par ailleurs, la position de l'Andra en tant que porteur du projet européen a favorisé naturellement, sans favoritisme, un bon positionnement des acteurs français dans celui-ci.

Cette démarche s'inscrit dans le cadre de la volonté de la CE – qui finance depuis plus de 40 ans des projets de recherche sur la gestion et le stockage des déchets radioactifs à travers Euratom – de soutenir non plus des initiatives individuelles, mais des programmes de recherche collaboratifs plus ambitieux. Consciente de l'ampleur des défis à relever à l'échelle européenne et de l'échelle de temps grande pour le développement des projets de stockage, la CE a souhaité soutenir un programme fédérateur regroupant les pays européens les plus avancés en matière de stockage de déchets, ceux les moins avancés et même ceux n'ayant pas d'industrie électronucléaire mais confrontés à la gestion de déchets radioactifs.

Doté d'un budget total de 60 millions d'euros, dont 32,5 millions sont financés par le programme EURATOM, le programme commun européen EJP-EURAD sur la gestion des déchets radioactifs a été officiellement lancé le 1<sup>er</sup> juin 2019, de même que sa première phase quinquennale de mise en œuvre (EURAD-1 2019-2024). Elle comprend sept *work packages* de RD&D, deux études stratégiques, trois *work packages* sur la gestion des connaissances, ainsi que des interactions avec la société civile. En plus des 51 organisations mandatées, EURAD-1 implique également plus de 50 organisations de recherche qui participent en tant qu'organisations tierces liées aux acteurs mandatés.

### Projet ITN-FINESSE

Le projet européen FINESSE, Fibre Nervous Sensing Systems, lancé en octobre 2016, est financé dans le cadre des Innovative Training Network grâce au fonds « Horizon 2020 research and innovation programme » sous le *grant agreement* Marie Skłodowska-Curie n° 722509. Il rassemble 26 universités, centres de recherche et partenaires industriels dont l'Andra et finance 15 thèses de doctorat à travers l'Europe et Israël.

Le projet vise à réaliser des progrès technologiques permettant de transférer les innovations sur les capteurs à fibres optiques développées en laboratoires (EFPL, Cambridge University, université de Bruxelles, etc.) vers les industriels présents dans le projet (fournisseurs de matériaux et fabricants de fibres tels ACREO, Fibercore, IPHT, etc.). Les sujets portent notamment sur les nouvelles techniques d'interrogation et les nouvelles fibres avec pour ambition l'élargissement des applications de cette technologie pour une société plus sûre.

L'Andra est membre du *board committee* et bénéficie dans ce contexte d'un financement pour la thèse d'Arianna Piccolo, lancée en avril 2017. Elle s'intéresse aux mesures de convergence de tunnels, en se concentrant sur l'interprétation de mesures de déformations orthoradiales, acquises par fibres optiques, jauges ou tout autre capteur sur des démonstrateurs d'alvéoles de stockage des déchets HA pour Cigéo. Au cours de sa thèse, différentes problématiques ont été traitées, depuis la modélisation des structures par éléments finis jusqu'à l'évaluation de l'impact de l'environnement de Cigéo (température, présence d'hydrogène et de radiations) sur les capteurs, dont les fibres et les câbles.

Durant sa thèse qui sera soutenue à l'été 2020, Arianna a participé à 5 écoles de formations, publié 2 articles et participé à plusieurs congrès nationaux et internationaux. Elle a également eu l'opportunité de pouvoir être accueillie et formée 13 mois, chez les partenaires du projet ITN-Finesse, en particulier par l'université de Cambridge (Royaume-Uni) qui implémente des capteurs à fibres optiques dans de très nombreux chantiers de génie civil et souterrain, par le câblage Brugg (Suisse), fournisseur de câble à fibre optique de mesures et par l'université de Nantes, son école doctorale de rattachement.

Témoignage  
Arianna  
PICCOLO



## Arianna PICCOLO

Doctorante Andra, Service Coordination opérationnelle, Caractérisation et Chaînes de données, Direction de la Recherche et Développement

Effectuer ma thèse à l'Andra, dans le cadre du projet européen FINESSE, a été une expérience professionnelle et humaine très enrichissante. Au-delà de la découverte de la culture française, différente mais aussi si proche de ma culture italienne et de la possibilité de voyager, c'est une opportunité unique de faire l'apprentissage de la recherche (participation

à des conférences, échange avec les grands experts scientifiques dans le domaine, etc.) à la fois dans un cadre industriel et sur un projet d'enjeu sociétal. Cette expérience, rendue possible grâce au financement du projet par l'Europe et l'Andra, m'ouvre les portes d'une future carrière européenne.

## MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES

En 2018 et 2019, l'Andra s'est de nouveau impliquée fortement dans les échanges avec la communauté scientifique nationale et internationale, notamment en participant à 31 manifestations scientifiques dont 28 à l'international sur la seule année 2019.

### Organisation par l'Andra du 5<sup>e</sup> Workshop du projet international DECOVALEX, à Nancy

Le 5<sup>e</sup> Workshop du projet international DECOVALEX, organisé par l'Andra à l'École des mines de Nancy du 24 au 26 avril 2018, a réuni 68 participants venus de 11 pays d'Europe, d'Amérique du Nord et d'Asie. Le projet DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments), initié en 1992, est une collaboration internationale pour faire progresser la compréhension et la modélisation des processus couplés thermo-hydro-mécaniques-chimiques (THMC) dans les systèmes géologiques et en est actuellement dans sa phase 2016-2019.

La task E « Upscaling of THM modelling results from small scale to one-to-one scale », coordonnée par l'Andra, réunit cinq équipes [LBNL (États-Unis), UFZ/BGR (Allemagne), Quintesa (Royaume-Uni), NWMO (Canada) et Andra] autour de quatre exercices de modélisation :

- un premier exercice de vérification des modèles, basé sur la comparaison des simulations numériques avec une solution analytique ;
- un deuxième exercice à « petite échelle » relatif à l'expérimentation TED (réalisée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne) où les équipes utilisent les données expérimentales pour calibrer leurs modèles ;
- un troisième exercice (en deux phases) à l'échelle d'un alvéole (essai LUCOEX au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne) : une première phase de prédiction des résultats expérimentaux en utilisant les paramètres issus de l'exercice précédent, puis une amélioration des modèles, si nécessaire ;
- un quatrième exercice (actuellement en cours) où les équipes doivent proposer une stratégie pour réaliser les calculs à l'échelle d'un quartier de stockage prenant en compte la variabilité des paramètres.

La comparaison des résultats lors du workshop confirme qu'un modèle thermo-poro-élastique est capable de reproduire d'une manière satisfaisante les résultats de l'expérimentation TED (réponse thermo-hydro-mécanique en champ lointain) menée dans le Laboratoire souterrain de l'Andra en Meuse/Haute-Marne. Les simulations thermiques réalisées à l'aveugle montrent que l'évolution de la température en dehors de la zone endommagée de la roche hôte autour d'un alvéole de stockage de déchets HA peut être reproduite en prenant les paramètres thermiques obtenus par la simulation



Photographie du workshop DECOVALEX à Nancy

de l'expérimentation TED. Pour les pressions interstitielles, les prédictions correspondent en termes de tendances même si les amplitudes diffèrent un peu.

Pour la task A « Modelling gas injection experiments », qui consiste à modéliser des essais d'injection de gaz dans des échantillons de bentonite (puis d'argilites du Callovo-Oxfordien), l'Andra s'appuie sur l'université polytechnique de Catalogne (UPC) pour développer des modèles hydromécaniques permettant de représenter finement le comportement dilatant mais réversible lors des injections de gaz. L'approche prise par l'UPC fait partie de celles qui permettent d'avoir les résultats les plus satisfaisants, malgré la complexité des phénomènes à prendre en compte dans ces exercices de modélisations de propagation de gaz dans des échantillons de bentonite.

### 2<sup>nd</sup> International Conference on Monitoring in Geological Disposal Radioactive Waste : Modern2020

La 2<sup>nd</sup> International Conference on Monitoring in Geological Disposal Radioactive Waste qui a eu lieu du 9 au 11 avril 2019 à Paris a marqué la fin du projet européen Modern2020 « Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal », piloté par l'Andra. Ce projet visait à fournir les moyens d'élaborer et de mettre en œuvre un programme de surveillance efficace et efficient d'un stockage géologique profond en prenant en compte les exigences spécifiques de chaque pays concerné. La conférence finale, qui a réuni plus de 150 participants et 90 organisations, a permis de présenter les développements et les résultats du projet européen Modern2020, ainsi que d'échanger les points de vue autour des grandes thématiques du projet : stratégies de surveillance, technologies innovantes de monitoring [transmission sans fil, sources d'énergie alternatives (hors

Témoignage de  
Johan  
BERTRAND



Photographie des participants à la seconde conférence internationale du projet Modern2020

batteries chimiques), etc.], démonstrateurs à l'échelle 1:1 (dans les laboratoires souterrains de recherche) de systèmes de surveillance tels qu'envisagés sur les premiers ouvrages d'intérêt des différents stockages, contribution du monitoring dans les processus de décision du développement des stockages et rôle du monitoring vis-à-vis du dialogue avec les différentes parties prenantes dont les populations locales. L'ensemble des sujets présentés lors de cette conférence ainsi que les documents produits dans le cadre de ce projet sont disponibles sur [www.modern2020.eu](http://www.modern2020.eu).

#### **Participation de l'Andra au Side Event de la 62<sup>e</sup> Conférence générale de l'AIEA, dédié à la transformation numérique du nucléaire français**

À l'initiative de la SFEN, dans le cadre de la 62<sup>e</sup> Conférence générale de l'AIEA, l'Andra a participé le 17 septembre 2018 à un Side Event dédié à la transformation numérique du

nucléaire français, en présentant le travail collaboratif mené par les Directions de la Recherche et Développement et de l'Ingénierie (Development of Simulation and Digitalization of Cigeo project to support design, operating, survey and long-term safety assessment). La contribution des différents travaux numériques de l'Andra (simulation numérique des processus, modélisation géologique, maquette numérique) aux objectifs de sûreté d'exploitation et d'après fermeture, à la conception, et aux travaux d'observation/surveillance a été illustrée à travers des exemples concrets. Cette intervention traduit l'ambition de l'Andra à développer à terme un jumeau numérique 3D de Cigéo.

#### **Journée thématique « Matériaux innovants pour le stockage »**

Le 28 mai 2019, la journée thématique « Matériaux innovants pour le stockage », organisée par l'Andra dans le cadre

» Témoignage  
Guillaume  
PÉPIN



### Johan BERTRAND

Ingénieur R&D instrumentation,  
Service Coordination opérationnelle,  
Caractérisation et Chaînes de  
données, Direction de la Recherche  
et Développement

Être coordinateur scientifique du projet Modern2020, comptant 29 partenaires, pendant ces 4 dernières années, a consisté à faciliter l'atteinte des objectifs et garantir un haut niveau technique et rédactionnel du projet, mais aussi à s'assurer de la bonne visibilité des résultats. Le projet Modern2020 a permis de mettre en place des outils tant stratégiques que techniques pour accompagner la construction d'un programme de surveillance d'un stockage géologique profond. D'un point de vue opérationnel pour l'Andra, les avancées réalisées dans les domaines de l'instrumentation et de la surveillance des alvéoles HA sont notables.



### Guillaume PÉPIN

Chef du Service Évaluation  
et Analyse de Performance,  
Direction de la Recherche  
et Développement

Lors du Side Event, la comparaison des différentes approches (EDF, CEA, Orano et Andra) sur l'apport des technologies numériques et digitales, actuelles et futures (simulation, big data, maquette et jumeau numérique, etc.), à leurs différentes activités a été très enrichissante. Les différentes présentations ont ainsi permis de dresser un panorama des enjeux et challenges numériques chez les principaux acteurs nucléaires français, et, compte tenu du retour d'expériences chez certains participants comme EDF, de faire émerger l'intérêt croissant du jumeau numérique d'une installation nucléaire, comme un outil fédérateur de performance et de compétitivité.



du projet Cigéo, a rassemblé une cinquantaine de personnes autour de trois axes principaux : géopolymères, céramiques et nouveaux matériaux, dont les matériaux composites et la fabrication additive. Cette journée a été l'occasion pour les industriels et académiques présents de partager les derniers résultats issus des programmes de R&D pilotés par l'Andra et d'échanger avec des personnes issues des différentes directions de l'Agence, des membres du Conseil scientifique et de la Commission nationale d'évaluation.

L'ensemble des travaux présentés, recherches académiques (thèses Andra) mais également projets plus industriels menés en collaboration avec des PME (Porcelaine Bernardaud, SAIREM...) visent au développement de matériaux alternatifs aux solutions de référence actuelles (aciers, bétons). Les développements sur cette thématique se poursuivent avec pour objectif de valider les concepts à l'échelle des laboratoires (montée d'un TRL 3 à un TRL 4) d'ici la phase industrielle pilote de Cigéo (horizon à 10 ans), notamment pour :

- les matériaux géopolymères issus de la valorisation des argillites excavées et leurs applications dans la protection au feu (colis de stockage des déchets MA-VL) ou comme nouveaux composites inorganiques pour le chemisage des alvéoles HA ;
- les technologies de traitement thermique (micro-ondes ou torche plasma) pour la fermeture des conteneurs de stockage céramiques des déchets HA.

De nouveaux sujets de recherche ont également été abordés, comme l'utilisation pour le chemisage des alvéoles HA de composites à matrice céramique développés par l'industrie aéronautique.

### **7<sup>e</sup> Long-term prediction of corrosion damage in nuclear waste systems (LTC)**

Du 19 au 21 novembre 2019, l'Andra a co-organisé avec le CEA et le Cefracor (Centre français de l'anti-corrosion), la 7<sup>e</sup> édition du workshop «Long-term prediction of corrosion damage in nuclear waste systems (LTC)». Organisé tous les 3 ans, il regroupe les corrosionnistes spécialistes des stockages et entreposages de déchets nucléaires (agences similaires à l'Andra, organismes de R&D et partenaires industriels).

70 participants, industriels et organismes de R&D, ont ainsi échangé sur un ensemble très large de thématiques. Des présentations sur des problématiques de corrosion de l'Andra ont ainsi été exposées par ses partenaires :

- processus de corrosion des aciers bas carbone des composants des alvéoles de déchets HA (corrosion généralisée, corrosion sous contrainte, corrosion assistée par les micro-organismes) : essais en laboratoire « jour » et essais in situ ;

- corrosion de revêtement innovant aluminium-zinc envisageable pour les conteneurs de stockage de déchets HA ;
- corrosion de l'aluminium et du magnésium en milieu cimentaire pour des déchets TFA ;
- monitoring de la corrosion.

Pour l'Andra, LTC est l'occasion d'échanges approfondis avec ses homologues étrangers et leurs partenaires de recherche. De nombreux travaux en lien avec les différents concepts de stockage étrangers ont été présentés, notamment sur l'ensemble des processus de corrosion des aciers non alliés et du cuivre, dans les différents environnements retenus dans les concepts de stockage (milieux granitiques, argileux ou salins, avec ajouts de matériaux cimentaires ou argileux entre les matériaux métalliques et la roche).

### **9<sup>th</sup> European Commission Conference on EURATOM Research and Training in Safety of Reactor Systems**

Du 4 au 7 juin 2019, les conférences FISA'19 (recherche sur la sûreté nucléaire) et EURADWASTE'19 (recherche sur la gestion des déchets radioactifs) se sont tenues conjointement à Pitești, en Roumanie.

Co-organisé par la Commission européenne, le ministère roumain de la Recherche et de l'Innovation et l'Institut pour la recherche nucléaire (RATEN ICN) sous les auspices de la présidence roumaine de l'UE en 2019, cet événement, qui a réuni environ 500 participants, visait à :

- présenter les progrès et les principales réalisations du programme de recherche EURATOM (P7 et H2020) depuis la précédente édition de la conférence en 2013 ;
- renforcer les discussions sur l'état des lieux de la R&D et les principaux défis aux niveaux nationaux, européen et international en termes de politiques de recherche et d'innovation, de synergies et de partenariats au profit des programmes de recherche et d'innovation ; d'innovation et de perspectives d'avenir.

EURADWASTE'19 a marqué le lancement officiel d'EURAD avec une présentation donnée lors d'une session plénière.

Les groupes de discussion d'EURADWASTE'19 ont souligné l'importance de la gestion des connaissances pour les agences, les régulateurs, les organismes de recherche et les organismes internationaux de l'AIEA et de l'AEN, ainsi que le rôle de la R&D pour aider à maintenir les compétences et à rendre attrayantes les professions scientifiques et techniques liées à la gestion des déchets. C'est dans ce contexte que la Commission européenne a également récompensé le travail des doctorants travaillant dans les projets de recherche d'Euratom.

## 03 LA GOUVERNANCE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE L'ANDRA



### Yvan LAGADEUC

Professeur à l'Université de Rennes 1 au sein du laboratoire Écosystèmes, Biodiversité, Évolution (ÉCOBIO)

En 2018, les travaux du Conseil scientifique de l'Andra ont majoritairement porté sur l'analyse des travaux scientifiques et technologiques des équipes de la Direction de la Recherche et Développement relatifs au projet Cigéo. La première chose qui ressort de ce travail, en relation directe avec les enjeux associés à Cigéo, c'est la rigueur, la qualité scientifique, et la mobilisation d'un champ de compétences très vaste, réalisée soit au sein de l'Andra, soit en partenariat avec des équipes académiques. Le domaine scientifique que je représente, celui de l'environnement et plus précisément celui du fonctionnement des socio-écosystèmes, est, et sera, mobilisé sur les enjeux de la transition que le territoire va subir dans le cadre de la mise en œuvre d'un tel projet industriel. Au sein du conseil, nous pensons que les moyens dédiés et l'expérience que l'Andra va développer devront servir pour faire évoluer les référentiels des études d'impact. Il nous apparaît indispensable que l'ensemble du travail fourni dans le domaine qui est le mien puisse être valorisé au-delà de l'Andra et de ses missions premières.

## CONSEIL SCIENTIFIQUE

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 présentés par l'agence.

Témoignage de  
Yvan  
LAGADEUC

Le Conseil scientifique de l'Andra a accueilli en mars 2018 deux nouveaux membres :

- Cécile Ferry, adjointe au chef de programme Aval du Cycle, responsable du Domaine « gestion des déchets », à la Direction de l'Énergie nucléaire du CEA, qui possède une connaissance approfondie des problématiques scientifiques et techniques de l'Andra et, notamment, du comportement des radionucléides et la chimie des environnements des déchets en situation de stockage ;
- Yvan Lagadeuc, professeur à l'université de Rennes 1 au sein du laboratoire Écosystèmes, Biodiversité, Évolution (ÉCOBIO), qui apportera son éclairage dans le domaine de l'environnement.

Par ailleurs, Patrick Landais a été nommé le 30 janvier 2019 Haut-Commissaire à l'énergie atomique, devenant, de droit, membre du Conseil scientifique.

En 2018 et 2019, le Conseil scientifique s'est prononcé sur les travaux de R&D de l'Andra à travers 9 avis portant sur des thématiques à forts enjeux pour la conception et l'évaluation de sûreté du stockage Cigéo :

- le modèle hydrogéologique du milieu géologique à l'Actuel et son évolution sur le prochain million d'années ainsi que la représentation du bloc géologique 3D sur la ZIRA ;
- la représentation de la zone endommagée du Callovo-Oxfordien au pourtour immédiat des ouvrages fond de Cigéo, dans le cadre de l'évaluation du domaine transitoire hydraulique-gaz de Cigéo à grande échelle, mais également dans l'unité silto-carbonatée (USC) ainsi que ses capacités de cicatrisation hydraulique (unité argileuse (UA) et USC) ;
- la conception, la réalisation et l'évolution de l'alvéole HA, mais aussi des ouvrages de fermeture fond et des liaisons surface-fond.

Cette démarche se poursuivra jusqu'au dépôt du dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo (DAC). En parallèle, le Conseil scientifique accompagne depuis 2019 l'Andra dans sa réflexion stratégique sur les futures orientations de son programme de R&D scientifiques et techniques, en préparation des étapes qui suivront le dépôt de DAC.

## COMITÉ TECHNIQUE SOUTERRAIN

L'Andra renforce l'évaluation de ses études en matière de travaux souterrains avec la création du Comité technique souterrain.

Le 28 mars 2018, l'Andra a lancé son Comité technique souterrain (CTS). Il a pour mission d'émettre des avis techniques sur les activités de l'Andra principalement dans le domaine des ouvrages et travaux souterrains, notamment en lien avec le projet Cigéo. Créé pour une durée de 5 ans renouvelable, le CTS est constitué de 11 membres externes et indépendants de l'Andra, français et étrangers, reconnus pour leur expertise.

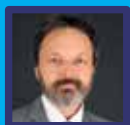
Témoignage  
Michel  
DEFFAYET

Les sujets abordés en 2018 par l'Andra avec le CTS ont été :

- la conception des ouvrages souterrains, dont la géotechnique et l'interaction sol et structure (loi de comportement et utilisation des matériaux compressibles) ;
- les travaux souterrains – méthodes (choix du tunnelier, type de voussoirs, etc.) ;
- la conception et la réalisation des ouvrages verticaux à grande profondeur (puits) ;
- la sécurité incendie et la ventilation dans les ouvrages souterrains en phase travaux.



Photographie des membres du CTS lors de la réunion de lancement



## Michel DEFFAYET

Président du CTS, directeur du CETU et président de l'AFTES

Le Comité technique souterrain (CTS) a été mis en place début 2018 et se sera réuni 6 fois à la fin 2019. Constitué d'experts extérieurs à l'Andra, ce comité a pour mission d'émettre des avis et recommandations sur les dispositions envisagées pour la réalisation de Cigéo pour ce qui concerne les travaux et l'exploitation des ouvrages souterrains.

Les études, recherches et expérimentations déjà menées par l'Andra pour préparer le dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de Cigéo représentent une base de connaissances colossale que les experts du CTS ont commencé progressivement à s'approprier avant de questionner les choix techniques, ou encore proposer des pistes d'approfondissement. Leurs observations préparent la suite car elles portent surtout

sur des aspects techniques qui seront mis au point dans les études de projet détaillées qui supporteront le dossier de demande d'autorisation de Cigéo.

L'apport de ce comité se situe essentiellement sur les questions de conception et de construction des ouvrages souterrains avec le souci que le projet s'appuie sur les retours d'expérience des autres réalisations et réponde avec pertinence aux exigences particulières du site de stockage : exigences de sécurité pendant les travaux et lors de l'exploitation, exigences de comportement des structures à court et à très long terme, exigences de qualité et de performance démontrée dans les matériaux choisis et dans les méthodes et techniques employées, etc.

## 04 L'ANDRA ET LE 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'appropriier les enjeux et d'exprimer son point de vue. Cela passe notamment par la diffusion de la culture scientifique et des savoirs que nous produisons 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 2018 et 2019, plusieurs actions impulsées par l'Agence ont contribué à faire vivre cette dynamique.

### Newsletter scientifique et parcours de micro-learning

Depuis 2017, l'Andra participe à Sciencetips, une newsletter gratuite visant à démocratiser l'accès à la culture scientifique. Chaque semaine, deux histoires scientifiques décalées, rédigées et validées par des spécialistes, sont envoyées par e-mail aux abonnés. En 2018, la décroissance radioactive ou le projet Cigéo ont notamment été expliqués de manière simple et ludique. En partenariat avec le même éditeur, l'Andra a également lancé un module de microlearning décryptant la radioactivité en 16 épisodes de huit minutes.

#### En savoir plus :

- <https://artips.fr/Sciencetips/>
- <https://www.microlearning-radioactivite.fr>





### Deux dossiers de *L'Esprit sorcier* sur les déchets radioactifs

En septembre dernier, l'Andra a ouvert ses portes aux journalistes de *L'Esprit sorcier*, média Web de vulgarisation scientifique.

Le duo Fred et Jamy, leur camion américain et leurs drôles d'aventures scientifiques... L'émission télévisée *C'est pas sorcier* a marqué toute une génération (1993-2014) en mettant à portée de tous les questions de science les plus complexes. Depuis 2015, *L'Esprit sorcier* a repris le flambeau sur le Web, sous la houlette de l'équipe fondatrice de l'émission culte. Fred Courant, créateur de *C'est pas sorcier*, puis de *L'Esprit sorcier*, s'est rendu avec son équipe sur les sites de l'Andra dans l'Aube et en Meuse/Haute-Marne pour créer deux dossiers consacrés aux déchets radioactifs à visionner sur *L'Esprit sorcier* et sur le site Internet de l'Andra.

### Une BD numérique sur les déchets radioactifs

Réalisée en partenariat avec l'Andra par neuf étudiants de l'école Estienne dans le cadre de leur cursus pédagogique, la BD numérique *480 mètres sous terre* – à découvrir sur la chaîne Youtube de l'Andra – propose de découvrir en réalité augmentée l'univers du Laboratoire souterrain de l'Andra et le stockage profond des déchets radioactifs.

### Invitation de Youtubers à visiter les installations de l'Andra

Dans le but d'encourager les jeunes à s'emparer de la thématique de la gestion des déchets radioactifs, l'Andra a reçu plusieurs youtubeurs (Dave Sheik, Simon Puech, Anonimal, Le Réveilleur, Astronogeek, Defekator) sur ses installations dans l'Aube et en Meuse/Haute-Marne. Objectif : leur permettre de découvrir le travail de l'Agence, mais aussi de se familiariser avec un sujet souvent méconnu des jeunes générations et d'exprimer librement leurs points de vue. À l'issue de ces visites, les vidéos qu'ils ont réalisées ont suscité des milliers d'échanges sur les médias sociaux.

**En savoir plus :** <https://www.andra.fr/des-youtubers-portent-le-debat-sur-la-gestion-des-dechets-radioactifs>



Extraits des vidéos de Youtubers lors de leur visite des installations de l'Andra

### Culture scientifique sur les territoires d'implantation de l'Andra

L'Andra organise régulièrement des manifestations, des expositions et autres animations sur ses sites, souvent en lien avec les grands rendez-vous nationaux ou régionaux à caractère scientifique. Cette programmation s'inscrit dans sa démarche d'information, mais également d'ouverture et de diffusion de la culture scientifique et technique.

En 2018, par exemple, des ateliers pédagogiques sur la radioactivité et l'énergie nucléaire ont été organisés, en partenariat avec la SFEN (Société française d'énergie nucléaire), à destination d'élèves de lycées riverains des centres de l'Andra dans l'Aube et la Manche. En novembre 2019, l'Andra a participé à l'opération « Profs en entreprise », donnant ainsi l'occasion à des professeurs de collèges et lycées de venir visiter le Laboratoire souterrain et d'échanger avec les scientifiques. L'Andra a également été partenaire de l'exposition « Les filles, osez les sciences ! » réalisée par l'association Accustica.

En mars 2019, l'Andra a participé au mois de la santé dans le Grand Est, avec la présentation de la comédie, *Le Grenier d'Élise ou la folle découverte des rayons X* à Joinville.

À l'occasion des 50 ans des premiers pas de l'homme sur la Lune, l'Andra a proposé plusieurs événements sur ses sites : une soirée d'observation de la Lune, au Centre de stockage de l'Aube, animée par l'association astronomique auboise ainsi que l'exposition « Voyage dans le système solaire et au-delà » créée par le Centre de culture scientifique et technique de Chambéry et exposée au Centre de l'Andra en Meuse/Haute-Marne.



Photographie de deux ingénieures de l'Andra lors de l'exposition « Les filles, osez les sciences ! »

Autres actions de diffusion de la culture scientifique : l'exposition « Amphibiens et reptiles de nos campagnes » et les animations sur le thème de la géologie locale, proposées au centre de l'Andra en Meuse/Haute-Marne, ou encore le cycle de conférences scientifiques, organisé par les centres industriels de l'Andra dans l'Aube, « l'invité de l'Andra ».

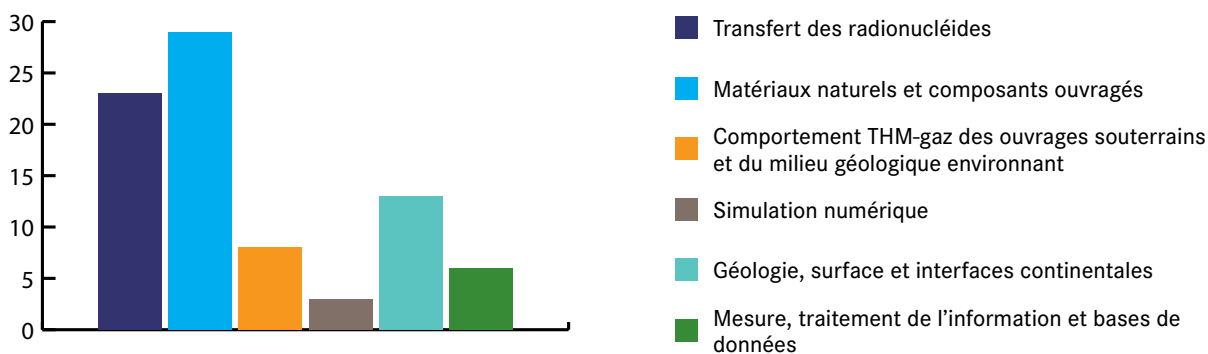
**En 2018 et 2019, 6 026 visiteurs ont pu découvrir le Laboratoire souterrain de l'Andra en Meuse/Haute-Marne.**

# 05 ANNEXES

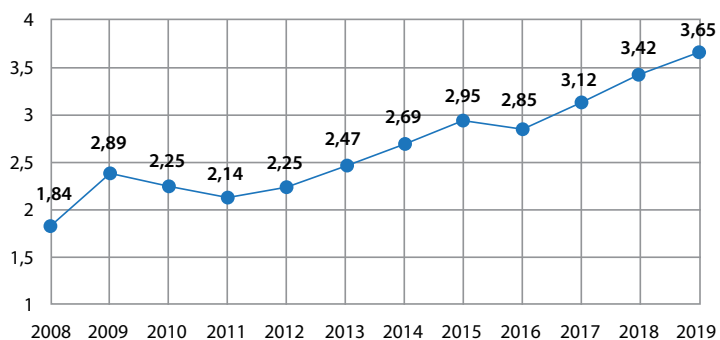
## 1. LES PUBLICATIONS

En 2018, l'Andra a contribué à la publication de 43 articles dans des revues de rang A, avec un *impact factor* moyen de 3,42. En 2019, ce nombre était de 39, avec un *impact factor* moyen de 3,65.

### Les publications dans des revues de rang A par thématique scientifique en 2018 et en 2019



### L'évolution de l'impact factor moyen depuis 2008



## 2. LES BREVETS 2018-2019 DANS LE DOMAINE DE LA R&D

Numéro	Date de dépôt	Intitulé
FR 18 52563	23/03/2018	Mesure de rayonnement alpha et/ou bêta provenant d'une surface solide (projet MAUD)
FR 18 54192	18/05/2018	Système de procédé d'imagerie par détection de rayonnements gamma (projet TEMPORAL)
FR 18 58924	27/09/2018	Moteur hydraulique à eau
FR 18 72189	30/11/2018	Procédé de suivi de la fabrication d'un objet en béton moulé
FR 1900437	18/01/2019	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
FR 1900438	18/01/2019	Béton mousse compressible et son utilisation
FR 1900700	25/01/2019	Composition pour la formation d'un géopolymère à propriétés ignifugées et mécaniques améliorées, procédé de fabrication de ce géopolymère et ses utilisations (projet INIFUGE)
FR 1901474	14/02/2019	Composition pour le conditionnement des déchets radioactifs et procédé de conditionnement (projet MATRICE)
FR 1905248	20/05/2019	Composition et fabrication matrice géopolymère
US 16446471	19/06/2019	Multi-capture compton camera and method of imaging (projet TEMPORAL)
FR 1908146	18/07/2019	Procédé de fabrication d'un dispositif de mesure optique apte à fonctionner sous rayonnement ionisant et dispositif de mesure optique apte à fonctionner sous rayonnement ionisant (projet CAMRAD)
FR 1911093	07/10/2019	Bloc de construction compressible à vide préfabriqué, pouvant s'intégrer dans les revêtements de galeries par méthodes traditionnelles ou par méthode au tunnelier
FR 1911428	14/10/2019	Dispositif pour séparer l'âme et la gaine d'un câble et procédé de séparation de l'âme et la gaine d'un câble (projet ORCADE)
FR 1913408	28/11/2019	Système de détection chimique, unité de commande et d'analyse pour un tel système et procédé de détection chimique (corde VIBRANTE)
FR 1915104	20/12/2019	Jaugeage automatique d'un cours d'eau

## 3. LES THÈSES ANDRA SOUTENUES EN 2018-2019

### Transfert des radionucléides

- *Impact de l'élévation de la température jusqu'à 80 °C sur le comportement des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien : application à l'uranium* – **Flávia Maia** - Laboratoire Subatech de l'université de Nantes (30/05/2018)

### Matériaux naturels et composants ouvrages

- *Modélisation du rôle des produits de corrosion sur l'évolution de la vitesse de corrosion des aciers au carbone en milieu désaéré et carbonate* – **Maalek Mohamed Said** - Laboratoire ICB de l'université de Bourgogne (06/03/2018)
- *Formation et dégradation de revêtement Zn-Ni sur acier galvanisé : identification des mécanismes réactionnels* – **Thomas Sanchez** - Laboratoire laSIE de l'université de la Rochelle (15/01/2018)
- *Risques de corrosion associés à une interface hétérogène acier/matériau de remplissage/argilites : couplages galvaniques* – **Mathieu Robineau** - Laboratoire laSIE de l'université de la Rochelle (12/12/2018)
- *Valorisation des argilites du Callovo-Oxfordien sous forme de liant alcalinement activé dans le but de développer un colis injectable* – **Colin Dupuy** - Laboratoire des Sciences des Procédés Céramiques de l'université de Limoges (20/09/2019)
- *Procédé d'assemblage par chauffage micro-ondes à température modérée d'un matériau céramique alumino-silicaté pour surconteneur de déchets radioactifs* – **Greg Kalfayan** - Laboratoire Georges Friedel de l'École des mines de Saint-Étienne (06/05/2019)
- *Rupture ductile d'un conteneur de déchets radioactifs HA soudé et soumis à une corrosion généralisée* – **Jérémy Serveaux** - Laboratoire ICD/LASMIS de l'UTT de Troyes (05/12/2019)

### Comportement THM-gaz des ouvrages souterrains et du milieu géologique environnant

- *Contributions de l'endommagement radoucissant à la zone de rupture autour des tunnels profonds dans les roches quasi-fragiles* – **Edoardo Trivellato** - Laboratoire Navier de l'École des ponts ParisTech (18/12/2018)
- *Thermo-hydro-mechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian claystone Effects of stress paths and temperature changes de l'endommagement radoucissant à la zone de rupture autour des tunnels profonds dans les roches quasi-fragiles* – **Philipp Braun** - Laboratoire Navier de l'École des ponts ParisTech (06/05/2019)
- *Étude expérimentale et numérique du comportement hydromécanique des matériaux à base de pellets d'argile gonflante* – **Benjamin Darde** - Laboratoire Navier de l'École des ponts ParisTech (05/12/2019)

### Simulation numérique

- *Simulation d'écoulements non newtoniens en milieu poreux macroscopique par la méthode de lattice-Boltzmann* – **Romarc Kostenko** - Labo FAST de l'université Paris Sud (11/12/2019)
- *Modélisation à l'échelle microscopique des fluides et des solutés dans des argiles saturées et insaturées* – **Sébastien Le Crom** - Laboratoire Phenix de l'université Pierre-et-Marie-Curie (28/10/2019)

### Mesure, traitement de l'information et bases de données

- *Performances des capteurs à fibre optique basés sur les diffusions Brillouin, Rayleigh et Raman en environnement sévère* – **Isabelle Planes** - Laboratoire Hubert Curien - Université de Saint-Étienne (09/10/2019)
- *Optimisation de l'instrumentation pour le suivi et l'évaluation de l'état des alvéoles de stockage de déchets radioactifs* – **Élodie Chapoulade** - Institut Pascal de l'université Blaise-Pascal (16/12/2019)

## 4. LES MEMBRES DU CONSEIL SCIENTIFIQUE ET DES COMITÉS SCIENTIFIQUES SPÉCIALISÉS

### Les membres du Conseil scientifique 2015-2020

<b>Eduardo ALONSO</b>	Président de l'université polytechnique de Catalogne (Espagne)
<b>Philippe BEHRA</b>	Professeur des universités – École nationale supérieure des ingénieurs en arts chimiques et technologiques (ENSIACET) - Institut national polytechnique (INP) de Toulouse
<b>Marc DEMARCHE</b>	Directeur général de l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF) (Belgique)
<b>Cécile FERRY</b>	Adjointe au chef de programme Aval du Cycle, responsable du domaine Gestion des déchets, à la Direction de l'Énergie nucléaire du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)
<b>Christian FOUILLAC</b>	Directeur de la Recherche du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) jusqu'en 2010. Président du Conseil scientifique
<b>Gabrielle HECHT</b>	Professeur en sécurité nucléaire à l'université de Stanford (États-Unis)
<b>Isabelle HERLIN</b>	Représentante de l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria) auprès de l'Union européenne
<b>Yvan LAGADEUC</b>	Professeur à l'université de Rennes 1 au sein du laboratoire Écosystèmes, Biodiversité, Évolution (ÉCOBIO)
<b>Roger SALAMON</b>	Directeur honoraire de l'Institut de santé publique, d'épidémiologie et de développement (ISPED)
<b>Jean-Michel TORRENTI</b>	Directeur du département « Matériaux et structures » de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR)
<b>Pierre TOULHOAT</b>	Directeur général délégué, directeur scientifique et directeur de l'Institut Carnot du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)
<b>Patrick LANDAIS</b>	Haut-Commissaire à l'énergie atomique, membre de droit

**Les membres du Comité d'orientation et de suivi des expérimentations dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (COS) 2015-2020**

Thématique/ Compétence	Nom	Éléments de CV
Géotechnique et génie civil	Michel DEFFAYET	Directeur du CETU (Centre d'étude des tunnels)
Géochimie (milieu géologique, matériaux)	Laurent MICHOT	Directeur de recherche au CNRS – Université Pierre-et-Marie-Curie (UPMC), vice-président du COS
Transferts de masse et de chaleur en milieu poreux et en milieu ouvert	Michel VANDENBEUSCH	Expert en hydrogéologie, ancien responsable « stockages » d'ANTEA
	Michel VAUCLIN	Directeur de recherche au CNRS Président du COS
Géophysique	Frédérique FOURNIER	Géologue principal et directrice des opérations à BEICIP-FRANLAB
Géologie		
Instrumentation/ capteurs/traitement des données	Pascal ROYER	Enseignant-chercheur à l'université technologique de Troyes
	Franck SCHOEFS	Professeur à l'université de Nantes
Génie mécanique et génie nucléaire (Manutention/transfert/ conception des colis de stockage)	Philippe VELUT	Ancien Chef de projet et coordinateur d'études AREVA NP
Gestion des laboratoires souterrains	Paul BOSSART	Directeur du consortium international « Mont Terri Project » (Suisse)

Les membres du Comité d'orientation et de suivi des travaux de l'Observatoire pérenne de l'environnement en Meuse/Haute-Marne (COS-OPE) de 2015 à 2020		
Thématique/ Compétence	Nom	Éléments de CV
Atmosphère	Gilles BERGAMETTI	Directeur de recherche au CNRS
Géochimie	Jérôme GAILLARDET	Professeur à l'Institut de physique du globe de Paris
Hydrologie		
Hydrogéologie	Frédéric DELAY	Professeur à l'université de Strasbourg
Agronomie	Marc VOLTZ	Directeur de recherche à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae)
Science du sol		
Écologie	Yvan LAGADEUC	Professeur à l'université de Rennes 1 Président du COS-OPE
Hydrologie		
Écologie (biodiversité)	Nathalie MACHON	Professeur au Muséum d'histoire naturelle de Paris
Géochimie	Frédéric VILLIERAS	Directeur de recherche au CNRS Vice-président du Conseil scientifique de l'université de Lorraine
Biogéochimie	André MARIOTTI	Professeur émérite UPMC Sorbonne-Université Membre honoraire de l'Institut universitaire de France



Les membres du Comité technique souterrain (CTS)	
Nom	Éléments de CV
<b>Tarcisio B. CELESTINO</b>	Président de l'AITES (Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain)
<b>Michel DEFFAYET</b>	Directeur du Centre d'études des tunnels (CETU), Président de l'AFTES (Association française des tunnels et de l'espace souterrain) Président du CTS
<b>Denis GIORDAN</b>	Lieutenant-colonel SDIS de Savoie, directeur départemental adjoint, conseiller technique risques radiologiques et nucléaires
<b>Alain GUILLOUX</b>	Expert indépendant, ex-directeur de Terrasol (par exemple : SETEC), membre du Comité d'experts de Grand Paris Express
<b>Michel GUILMAIN</b>	Expert indépendant en ventilation nucléaire et sûreté
<b>Pierre HINGANT</b>	Expert tunnels méthodes et travaux (par exemple : EGIS)
<b>Alain LE GAC</b>	Directeur des programmes R&D EDF, ex-directeur du CNPE Nogent
<b>Christian MAQUAIRE</b>	Ex-conseiller du PDG d'Eurotunnel, ex-maître d'ouvrage de la reconstitution du tunnel sous la Manche, membre du comité industriel de l'Andra
<b>Jack-Pierre PIGUET</b>	Ex-directeur du Laboratoire souterrain de l'Andra en Meuse/Haute-Marne, ex-directeur de l'École des mines de Nancy
<b>Alain ROLLET</b>	Ex-président-directeur général MDP (Mines de potasse d'Alsace)
<b>Alain VIAL</b>	Expert souterrains, spécialiste des tunneliers (par exemple : Vinci)

## 5. LES RESPONSABLES DES ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES À L'ANDRA

	Noms	Fonction
	Frédéric PLAS	Directeur de la recherche et développement
	Marc LEGUIL	Directeur de l'ingénierie



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, savoir-faire et outils scientifiques, Direction de la Recherche et Développement ([marie-anne.bruneaux@andra.fr](mailto:marie-anne.bruneaux@andra.fr))

## TABLE DES SIGLES

- AFTES** : Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain
- AHA** : Démonstrateur d'Auscultation des alvéoles HA (mené au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
- AIEA** : Agence Internationale de l'Énergie Atomique
- ALC** : Alvéole HA (expérimentations menées au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
- AllEnvi** : Alliance de recherche pour l'Environnement
- AMORAD** : Projet ANR « Amélioration des modèles de prévision de la dispersion et d'évaluation de l'impact des radionucléides au sein de l'environnement »
- Andra** : Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs
- ANR** : Agence Nationale de la Recherche
- APD** : Avant-Projet Détaillé
- ASN** : Autorité de Sûreté Nucléaire
- AUS** : Frein d'Arrêt d'Ultime Secours
- BGR** : Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles
- BHN** : Bentonite Hydratée Naturellement (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
- 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
- CE** : Commission Européenne
- CEA** : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives
- CETIM** : Centre Technique des Industries Mécaniques
- CETU** : Centre d'Études des Tunnels
- CDZ** : Compression mécanique de l'EDZ (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)
- Cigéo** : Centre Industriel de Stockage Géologique
- CLORA** : Club des Organismes de Recherche Associés
- CMHM** : Centre de Meuse/Haute-Marne
- 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
- COS** : Comité d'Orientat ion et de Suivi du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne
- COS-OPE** : Comité d'Orientat ion 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
- CSA** : Centre de Stockage de l'Aube
- CSM** : Centre de Stockage de la Manche
- CYBER** : Projet PIA « Recyclage innovant des bétons TFA en milieu radioactif »

**DAC** : Demande d'Autorisation de Création

**DECOVALEX** : Projet « DEvelopment of COupled models and their VALidation against Experiments »

**DGEC** : Direction Générale de l'Énergie et du Climat du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire

**DMOS** : Descriptif de Mode Opérateur de Soudage

**DOS** : Dossiers d'Options de Sécurité

**DPU** : Durée Pratique d'Utilisation

**ECUT** : East China University of Technology

**EDF** : Électricité de France

**EFESE** : Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques

**EDZ** : Excavation Damage Zone

**EJP** : European Joint Programme

**EURAD** : European Joint Programme on Radioactive Waste

**EURATOM** : Programme de recherche et de formation de la Communauté Européenne de l'Énergie Atomique

**FAU** : Frein d'Arrêt d'Urgence

**FA-VL** : Faible Activité à Vie Longue

**FE** : Faisceau d'Électrons

**GEO** : Base de données scientifiques

**GRD** : Galerie de Recherche et Développement

**GVA** : Galerie Voussoirs Anisotropes

**HA** : Haute activité

**IBE** : Investigations Bulbe d'Étanchéité (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)

**IGN** : Institut National de l'Information Géographique et Forestière

**IFPEN** : IFP Énergies nouvelles

**IFSTTAR** : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

**IMT-Atlantique** : Institut Mines-Telecom Atlantique

**Ineris** : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

**INPI** : Institut National de la Propriété Industrielle

**Inra** : Institut National de la Recherche Agronomique

**Inrae** : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (fusion de l'INRA et de l'IRSTEA en 2020)

**Inria** : Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique

**IPBES** : Plate-forme Intergouvernementale sur la Biodiversité et les Services Écosystémiques

**IRCER** : Institut de Recherche sur les Céramiques

**IRSN** : Institut de Recherche en Sécurité Nucléaire

**JOPRAD** : Joint Programming on Radioactive Waste Disposal

**LBNL** : Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley Lab), University of California/United States Department of Energy (DOE)

**LS** : Laboratoire souterrain de l'Andra en Meuse/Haute-Marne

**LUCOEX** : Projet Large Underground Concept Experiments (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)

**MAES** : Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services

**MAG** : Matériau de remplissage au contact de la roche Argileuse (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)

**MAV** : Matériau de remplissage au contact de la roche Argileuse (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)

**MA-VL** : Moyenne Activité à Vie Longue

**MEA** : Millenium Ecosystem Assessment

**METROPOLITIN** : Projet PIA « Métrologie politique des déchets industriels en Europe »

**Modern2020** : Projet Euratom « Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal »

**MOS** : Mode Opérateur de Soudage

**MOUV** : Groupement de Laboratoires (GL) « Comportement mécanique des structures et des composants »

**NIH** : Noyau de bentonite Incliné et Horizontal en forage (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)

**NOVA** : Plateforme intégrant et agrégeant les données disponibles dans les différentes bases de données scientifiques de l'Andra

**NSC** : Noyau de SCellement (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)

**NWMO** : Nuclear Waste Management Organization, homologue canadienne de l'Andra

**OHZ** : Observation et suivi de l'EDZ (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)

**Ondraf/Niras** : Organisme National belge de Gestion des Déchets Radioactifs et des Matières Fissiles Enrichies

**OPE** : Observatoire Pérenne de l'Environnement

**ORCADE** : Projet PIA « Ouverture vers un recyclage des câbles électriques déchets issus des sites nucléaires »

**PGZ** : Perturbation hydromécanique induite par les GaZ dans l'argilite saine (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)

**PI** : Propriété Intellectuelle

**PIA** : Plan d'Investissement d'Avenir

**PNGMDR** : Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs

**POSIVA** : WMO, homologue finlandaise de l'Andra

**QMOS** : Qualification de Mode Opérateur de Soudage

**REM** : Resaturation à Échelle Métrique (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)

**REs** : Organismes de Recherche

**RTE** : Réseau de Transport d'Électricité

**RTG** : Projet PIA « Radio-isotopic Thermal Generator (Générateur autonome isotopique) »

**RWM** : Radioactive Waste Management, homologue britannique de l'Andra

**SAGD** : Système d'Acquisition et de Gestion des Données scientifiques acquises au Centre de Meuse/Haute-Marne

**SFEN** : Société Française d'Énergie Nucléaire

**SIG** : Système d'information géographique

**SKB** : Organisme suédois de gestion des déchets radioactifs

**SOERE** : Système d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche et Environnement

**TED** : Propriétés et effets en température deux (expérimentation menée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne)

**TFA** : Très Faible Activité

**THM** : Thermo-Hydro-Mécanique

**THMC** : Thermo-Hydro-Mécanique-Chimique

**TSOs** : Technical Support Organisations (par exemple : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire en France)

**UA** : Unité Argileuse du Callovo-Oxfordien

**UFZ** : Helmholtz-Centre for Environmental Research GmbH (Allemagne)

**UPC** : Université Polytechnique de Catalogne

**USC** : Unité Silto-Carbonatée du Callovo-Oxfordien

**UT** : Unité de Transition du Callovo-Oxfordien

**VAL'M** : Projet PIA « Qualification industrielle d'un procédé de fusion décontaminant pour matériaux métalliques »

**VALOFUSION** : Projet PIA « Traitement des déchets métalliques tritiés par fusion et bullage puis valorisation du tritium extrait par un réacteur catalytique à membrane »

**WMOs** : Waste Management Organisations (par exemple : Andra en France)

**ZIRA** : Zone d'Intérêt pour la Reconnaissance Approfondie





**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](http://www.andra.fr)