



RAPPORT D'ACTIVITÉ R&D

2016

SOMMAIRE

RAPPORT D'ACTIVITÉ R&D

2016

1.	La R&D au service des projets et activités de l'Andra	9
2.	L'Andra et la communauté scientifique	29
3.	La gouvernance scientifique de l'Andra	37
	Annexes	39

ÉDITO

Établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle des ministères en charge de l'énergie, de l'environnement et de la recherche, l'Andra a une mission d'intérêt général : trouver, mettre en œuvre et garantir des solutions sûres pour protéger les générations présentes et futures des risques que représentent les déchets radioactifs produits en France.

L'Andra exploite actuellement deux centres industriels dans l'Aube pour stocker les déchets de très faible activité ainsi que les déchets de faible et moyenne activité à vie courte. Pour les déchets radioactifs les plus dangereux, les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue, l'Andra conduit le projet Cigéo (Centre industriel de stockage géologique) en Meuse/Haute-Marne.

La vie de l'Andra est rythmée régulièrement par de grands dossiers, tant pour les centres de stockage existants que pour les projets de stockage. L'année 2016 a été, de ce point de vue, une année remarquable avec les remises à l'ASN en juin 2016 des Dossiers d'options de sûreté en exploitation et en après-fermeture (DOS) du projet Cigéo, accompagnés du Dossier d'options techniques de récupérabilité des colis (DORec), et, en août 2016, du Dossier de réexamen de sûreté du Centre de Stockage de l'Aube (CSA). Ce dernier dossier, établi tous les dix ans, est un moment privilégié pour souligner l'excellence d'un centre industriel de gestion de déchets radioactifs en exploitation, aujourd'hui âgé de plus de vingt ans. Les DOS du projet Cigéo marquent, quant à eux, une étape fondamentale du développement du projet, en le faisant entrer dans sa dimension industrielle et en préfigurant le dépôt, par l'Andra, de sa demande d'autorisation de création, à l'horizon 2019.

L'élaboration de ces dossiers a mobilisé fortement les personnels de l'Andra. Les garants porteurs de la connaissance scientifique et technologique de l'Agence y ont pris une part importante, inscrivant leur travail dans la longue histoire de Cigéo, fruit de près de trente ans de recherches, effectuées dans le cadre de la loi de 1991 puis celle de 2006. À la suite du Dossier 2005, une étape importante avec la démonstration de la faisabilité de principe de Cigéo, le projet Cigéo s'est engagé depuis 2006 vers un objectif de mise en œuvre industrielle et est désormais dans sa phase de conception industrielle finale.

Pour préparer les échéances futures de l'Agence, à court terme mais aussi à long terme, l'Andra n'en a pas moins poursuivi son effort en matière de recherche, pendant toute l'année 2016. Cet effort a couvert un large spectre en termes de travaux scientifiques, de démonstrations technologiques et d'innovation ; il a vu se prolonger le renforcement de la gouvernance scientifique de l'Andra et la mobilisation de la communauté scientifique au travers du renouvellement de partenariats avec des organismes de recherche d'excellence.

Avec la lecture du rapport d'activité R&D 2016, je vous invite donc à partager le travail réalisé par l'Andra et ses partenaires, travail réalisé au service de l'intérêt général que représente la gestion des déchets radioactifs en France.



*Pierre-Marie Abadie,
Directeur général de l'Andra*

LA R&D À L'ANDRA



*Frédéric Plas,
Directeur de la recherche
et développement*



*Marc Leguil,
Directeur de l'ingénierie*



*Patrick Landais,
Directeur du développement,
de l'innovation et de l'international*

Avec la conception et l'exploitation de sites industriels, la R&D est l'une des trois missions sur lesquelles l'Andra appuie son action. Environ cent cinquante personnes (docteurs, ingénieurs et techniciens) sont en charge de cette R&D, sur un effectif total de l'Agence d'environ six cent cinquante personnes.

La R&D à l'Andra, ce sont également les outils de recherche exceptionnels que sont le Laboratoire Souterrain de recherche et l'Observatoire Pérenne de l'Environnement avec son Écothèque, localisés en Meuse/Haute-Marne, une douzaine de partenariats avec des organismes de recherche de haut niveau, la participation à de nombreux projets de recherche nationaux, européens et internationaux, plus de cinquante publications par an, une cinquantaine de doctorants et de post-doctorants dont une vingtaine est salariée de l'Andra. La R&D à l'Andra, c'est également un patrimoine de connaissances scientifiques et technologiques exceptionnel, fruit de plus de trente ans de recherche.

Couvrant un très large spectre de domaines ou disciplines (matériaux, géologie, géochimie, transferts, hydrogéologie, géomécanique, environnement, monitoring et traitement des données, simulation numérique, sciences humaines et sociales...) et les différents composants d'un stockage (éléments radioactifs, déchets, composants ouvragés, milieu géologique, environnements de surface...), cette R&D est portée majoritairement par la Direction de la Recherche et Développement, et par la Direction de l'Ingénierie. Depuis 2015, la création de la Direction du développement, de l'innovation et de l'international contribue à cet ensemble, pour déployer des actions de gestion des connaissances et favoriser une dynamique d'innovation transverse.

TEMPS FORTS DE LA R&D 2016

JUIN

■ Remise à l'ASN
des *Dossiers d'options
de sûreté*
et du *Dossier d'options
techniques de récupérabilité*

*Premier essai de retrait
d'un colis HA en condition
de stockage, en mode
dégradé (présence de
produits de corrosion)*

Renouvellement
du partenariat
avec l'IFSTTAR

Nomination
d'Isabelle Herlin,
directrice du centre
Inria Lille –
Nord Europe,
au Conseil Scientifique
de l'Andra

Sélection des
doctorants
Andra
promotion
2016

Jalon « GO-NO GO »
du projet PIVIC d'incinération
et vitrification des déchets
technologiques issus de la
fabrication des combustibles
MOX, ayant conduit à la
poursuite des investissements
sur le prototype à l'échelle 1 du
four d'incinération-vitrification
(partie haute)

JANVIER

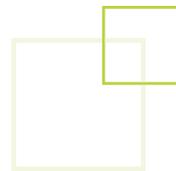
FÉVRIER

MARS

AVRIL

MAI

JUIN



AOÛT

Remise à l'ASN du dossier
de réexamen de sûreté du CSA

Démarrage de la campagne
de creusement d'alvéoles
HA avec mise en place d'un
matériau de remplissage à
base de ciment à l'extrados
du chemisage

Participation
à la journée
de lancement
de l'I-Site Lorraine
Université
d'Excellence (LUE)

Journée
d'information
et d'échange sur
Cigéo à l'attention
de ses partenaires
de R&D

Mid-Term
workshop du
projet JOPRAD

Premier résultat probant dans
le développement
d'un nouveau type de moteur
fonctionnant avec un fluide
à base d'eau

Journée
scientifique
de l'Observatoire
Pérenne de
l'environnement
(OPE)

Workshop du projet
européen de R&D
Modern2020 dédié à la
R&D sur l'observation
et la surveillance
(monitoring) des
stockages profonds
de déchets radioactifs

Renouvellement
du partenariat
avec le LNE

Appel à
projets de
thèses Andra
2017

Colloque
*Proving Futures
and Governing
Uncertainties
in Technosciences
and Megaprojects*

Septièmes
journées
techniques
sur les fibres
optiques en
milieu radiatif

JUILLET

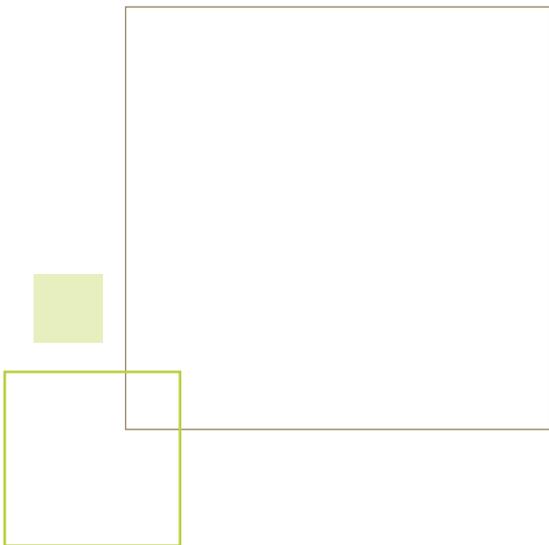
AOÛT

SEPTEMBRE

OCTOBRE

NOVEMBRE

DÉCEMBRE



1

LA R&D AU SERVICE DES PROJETS ET ACTIVITÉS DE L'ANDRA

VERS LE DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL DE CIGÉO

2016, une année à nouveau fortement marquée par le projet Cigéo, avec des avancées scientifiques et technologiques majeures, et la mise en place d'essais de démonstration, en vue de la mise en œuvre industrielle de Cigéo.

La démonstration technologique de la réalisation d'alvéoles HA avec mise en place d'un matériau à base de ciment à l'extrados du chemisage

Afin d'étudier la faisabilité technique du concept évolué d'alvéoles de stockage de déchets HA (mise en place du chemisage après creusement, et injection d'un matériau de remplissage à l'extrados du chemisage, conformément aux exigences spécifiées et dans des conditions raisonnables (durée de l'opération, effort appliqué sur le massif...), une nouvelle campagne de démonstrateurs dédiés a été initiée mi-2016, dans le Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Au-delà de cet objectif de démonstration de faisabilité technologique, ces nouveaux démonstrateurs visent également à consolider les données sur le comportement mécanique du chemisage et les échanges gazeux entre la galerie et l'alvéole, et à tester les performances des dispositifs envisagés pour la surveillance des alvéoles.

Pierre Robin
Ingénieur spécialiste des forages,
direction de l'Ingénierie



Nous avons relevé le défi qui consiste à creuser un alvéole HA correspondant à la longueur minimale des alvéoles HA de 80 mètres (correspondant à la longueur minimale des futurs alvéoles HA de Cigéo), avec un micro-tunnelier fortement modifié, à le retirer entièrement en galerie puis à pousser le chemisage définitif jusqu'au fond et à cimenter l'espace annulaire chemisage/argilites par l'intérieur du chemisage avec retour en galerie. Le challenge était de faire ces opérations suffisamment vite, avant que la convergence des argilites et l'écaillage sur les parois soient trop importants et bloquent l'avancée du tubage ou l'injection correcte du matériau de remplissage.



Microtunnelier

Témoignage(s)
Pierre Robin
Frédéric Bumbieler



Frédéric Bumbieler
Ingénieur en comportement
des structures métalliques,
service Mécanique des Fluides
et des Solides, direction
de la Recherche et Développement

Mi-2016 a démarré au Laboratoire Souterrain une campagne de réalisation de démonstrateurs d'alvéoles HA conformes au concept de référence établi en 2015, qui inclut notamment l'injection d'un matériau ciment-bentonitique à l'extrados du chemisage. Cette campagne expérimentale, dont l'objectif premier est d'évaluer la faisabilité de la constructibilité de ce type d'ouvrage, est également mise à profit pour acquérir des données complémentaires sur le comportement mécanique à court terme du chemisage en acier. Il s'agit notamment, au travers de mesures de convergence et de déformations locales, de mieux préciser l'interaction mécanique roche/matériau de remplissage/chemisage métallique, de manière notamment à vérifier le maintien de jeux suffisants pour le retrait des colis de stockage pendant la période d'exploitation, si besoin dans le cadre de la récupérabilité. Les premières mesures mettent en évidence un comportement similaire à ce qui a déjà été observé par le passé, à savoir un chargement mécanique anisotrope du chemisage par la roche, quelques jours à peine après injection du matériau de remplissage.

Un autre objectif important est celui de l'évaluation des échanges gazeux entre la galerie d'accès et l'alvéole, puisqu'ils influencent directement l'évolution des conditions environnementales au sein de l'alvéole, et plus particulièrement les cinétiques de corrosion des composants métalliques. Des systèmes de prélèvement de gaz sont ainsi systématiquement mis en place à l'intérieur de chaque démonstrateur. Enfin des dispositifs de mesure envisagés pour l'observation et la surveillance des alvéoles HA dans Cigéo telles que, par exemple, le suivi de la déformation et de la température du chemisage à l'aide de fibres optiques posées à l'extrados du chemisage, sont également testés dans le cadre de cette campagne expérimentale.



*Alvéole après retrait de la foreuse
et avant mise en place du chemisage*

Fin 2016, deux premiers démonstrateurs ont été réalisés avec succès (alvéole de 10 mètres de longueur puis alvéole de 40 mètres, avec mise en place du chemisage instrumenté et injection du matériau de remplissage à l'extrados du chemisage). Ces essais sont concluants : mise en place sans difficulté du chemisage dans le trou nu après foration, injection satisfaisante du coulis à base de ciment et de bentonite à l'extrados du chemisage depuis le fond de l'alvéole (en particulier, une quantité de coulis injecté, cohérente avec le volume estimé du vide annulaire entre le chemisage et la roche) et absence de fuite aux jonctions entre les tronçons de chemisage.

■ La démonstration de la faisabilité de voussoirs compressibles à base d'un mélange d'éléments coques en argilites cuites et d'un liant cimentaire, pour le soutènement des galeries et des alvéoles de déchets MA-VL

*Témoignage(s)
Jad Zghondi*

Les ouvrages souterrains du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne montrent des convergences importantes à court terme, puis un comportement différé asymptotique avec de faibles cinétiques de déformation. Sur une échelle de temps d'exploitation de plusieurs dizaines d'années à la centaine d'années environ, ces déformations différées peuvent conduire à un chargement important du revêtement en béton des ouvrages, et de ce fait, à un dimensionnement important des épaisseurs de ces revêtements. Une des solutions étudiées par l'Andra pour réduire les efforts transmis par le terrain au revêtement béton des ouvrages, est l'utilisation d'un revêtement en anneau de voussoirs préfabriqués compressibles, à l'aide d'un matériau *ad hoc* à l'extrados de la partie en béton classique du voussoir.

Ce voussoir VMC (copropriété de l'Andra et de la société CMC) est un voussoir bicouche, constitué d'une partie en béton classique, revêtue à son extrados d'une couche compressible à base d'un mélange d'éléments coques en argilites cuites et d'un liant cimentaire. Pour des raisons de mise en place, cette couche compressible est protégée par une mince couche de mortier.

Ce concept permet d'absorber les efforts de poussée du terrain par compressibilité de la couche en coques d'argilites cuites, permettant ainsi d'optimiser l'épaisseur de la partie en béton, et *in fine*, l'épaisseur totale du voussoir.



Des essais mécaniques (essais œdométriques et triaxiaux à grande échelle) et hydromécaniques ont été menés en laboratoire jour, pour quantifier la capacité de compressibilité de la couche d'argilites cuites et définir son modèle de comportement mécanique pour les calculs de dimensionnement.

La loi de comportement de la couche compressible de type milieu continu, développée par l'INERIS, décrit le comportement élastoplastique compressible initial puis la rigidification de cette couche, marquant la fin de sa capacité de compressibilité. Cette loi a été utilisée pour modéliser le comportement de galeries et a montré que le matériau compressible jouait bien un rôle d'amortisseur, en réduisant les contraintes appliquées au voussoir en béton armé. Une approche de modélisation de type « milieu granulaire » est également en cours afin de représenter, de manière plus fine, le transfert des charges, la rupture des éléments coques et les localisations potentielles.



Jad Zghondi

ingénieur en comportement des structures – service Mécanique des Fluides et des Solides, direction de la Recherche et Développement



Nous avons lancé un programme de RD&D important pour étudier le comportement et démontrer le fonctionnement du matériau compressible à base d'éléments coques en argilites cuites, utilisés dans des voussoirs bicouche « compressibles ». Ces voussoirs sont composés d'une couche compressible qui va permettre d'amortir les déformations du terrain, et d'un voussoir en béton armé classique : ils pourraient être utilisés dans le projet Cigéo mais aussi dans d'autres tunnels profonds où de fortes convergences sont attendues. Ce type de matériau fait l'objet de brevets avec la société CMC. Ces coques ressemblent à des petits morceaux de tube creux de dimensions plurimillimétrique : elles sont fabriquées avec de l'argilite broyée puis extrudée et cuite. On utilise un coulis cimentaire « barbotine » pour agglomérer les coques et les coller sur le voussoir en béton armé. On obtient ainsi un matériau avec une porosité importante qui lui permet de se comprimer sans transmettre beaucoup d'effort. Il a fallu mettre au point les formulations du ratio coque/barbotine, les processus de fabrication avec la société Stradal qui fabrique les voussoirs, et vérifier que le comportement répond aux besoins en termes de résistance initiale et de compressibilité, afin de pouvoir fabriquer industriellement les voussoirs que nous allons mettre en place dans la galerie dite GVA2 au Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne, dont le creusement est prévu en 2017. Nous avons réalisé, avec des laboratoires partenaires, des essais œdométriques et triaxiaux qui nous ont permis de caractériser le comportement mécanique et d'identifier les paramètres influençant ce comportement, puis de qualifier les formulations utilisées. On a démontré aujourd'hui que le matériau avait le comportement attendu, à l'échelle de l'échantillon.

La mise en œuvre dans la galerie GVA2 de ces voussoirs compressibles, à partir de juin 2017, devra confirmer la faisabilité technologique à l'échelle d'un tunnel et montrer le fonctionnement à l'échelle d'un ouvrage réel de 6 mètres de diamètre. Par ailleurs, des essais en laboratoire jour sur des anneaux de voussoirs sont prévus en 2018 pour simuler le comportement de l'ouvrage à plus long terme et confirmer l'effet d'amortisseur du matériau compressible. Après on pourra chercher à optimiser les caractéristiques du matériau (taille des coques, barbotine, process de fabrication...) pour le projet Cigéo.

La démonstration technologique de la récupérabilité des colis HA dans des conditions de stockage

Dans le cadre du programme d'essais technologiques du projet Cigéo, l'Andra a réalisé en 2016 un banc d'essais à l'échelle 1 en laboratoire jour, permettant de tester la capacité de récupérabilité des colis stockés en alvéole HA, dans des conditions d'environnement représentatives de l'état possible d'un alvéole HA après plusieurs dizaines d'années de stockage : (i) température de l'ordre de 90°C, (ii) forte hygrométrie ambiante (vapeur d'eau saturée) générant un fort enrrouillement du tubage et du colis (l'épaisseur du produit de corrosion est l'ordre de 1 mm, présent sous forme d'écailles). En effet, un des objectifs des essais est d'évaluer la capacité de traction du dispositif à vaincre des efforts de frottement éventuels, dus à cet enrrouillement.



État de corrosion interne simulé du chemisage



Yves Lorillon

Ingénieur, service Études Process
Mécaniques, direction de l'Ingénierie

Les essais se sont déroulés en surface de fin 2015 à début 2017. Un alvéole a été reproduit à l'échelle 1, sur une longueur de 25 m.

Les essais se sont déroulés en deux temps. Tout d'abord les essais de retrait, qui nous ont permis de valider le concept du robot de retrait et les efforts de traction nécessaires au retour du colis. Nous avons également pu quantifier un impact quasi nul, ou plutôt favorable, de la corrosion sur les efforts de traction.

Cette première phase a aussi permis d'identifier la nécessité d'effectuer une collecte des produits de corrosion avant le retrait d'un colis, afin de ne pas risquer un blocage de la chaîne cinématique du process (notamment pour la mise en place du bouchon d'exploitation), dû à une accumulation de produit en tête d'alvéole.

Dans un deuxième temps, l'Andra s'est donc consacrée au développement d'un robot de nettoyage sur la base éprouvée du robot de retrait. Le concept de raclage et de brossage du chemisage, a été validé par des essais. Ces derniers ont permis d'établir un cycle de référence, pour optimiser l'efficacité en temps opératoire. Des pistes d'amélioration sont identifiées.

Nous pouvons conclure que l'Andra a la capacité de retirer des colis HA, dans les conditions extrêmes définies pour ces tests. Les concepts du robot de retrait et du robot de nettoyage sont validés.

Le dispositif de retrait est un robot téléopéré, conçu pour évoluer dans cet environnement pénalisant pendant une heure. Il est automoteur pour arriver au niveau du colis et s'y connecter, en tractant le câble du treuil utilisé pour le retrait du colis et son ombilic d'alimentation.

Arrivé à proximité du colis à retirer, le robot est capable de se positionner au contact de ce dernier sans réaliser l'accouplement, afin d'inspecter le colis au niveau de la gorge de manutention et d'en vérifier l'état visuel général (à l'aide d'une caméra).

Une fois la vérification effectuée, le robot s'accroche au colis, par l'intermédiaire d'une pince prévue à cet effet. Le retour du robot et du colis est réalisé par un câble s'enroulant sur le treuil de traction. En cas de panne, il est toujours possible d'assurer le désaccouplement du robot et du colis.



Robot de retrait d'un colis

Les résultats des essais menés sur ce banc sont positifs. Ils ont permis à l'Andra (i) de valider le concept mécanique de retrait, (ii) de démontrer la capacité du robot à évoluer dans des conditions d'environnement particulières (T=90°C, hygrométrie saturée et produit de corrosion), (iii) de définir les efforts de traction nécessaires au retrait du colis, et (iv) de quantifier l'impact de la corrosion (négligeable, mais plutôt favorable) sur ces efforts.

Ces résultats ont également été source d'apprentissage et de capitalisation de retour d'expérience, pour le développement de dispositifs industriels susceptibles d'évoluer dans Cigéo (problématique des motorisations électriques et des composants électroniques soumis à haute température, humidité et rayonnements).

Les essais ont également mis en évidence un besoin complémentaire : la récupération des produits de corrosion avant le retrait du colis à l'aide d'un robot de nettoyage. Sans ce dispositif, une quantité importante de produits de corrosion est rapportée par le colis en tête d'alvéole, ce qui peut représenter une gêne à la chaîne cinématique et à la remise en place du bouchon d'exploitation des alvéoles HA.

L'Andra a donc développé en complément, sur la base éprouvée du robot de retrait, un système de nettoyage de l'alvéole par brossage et raclage. Les produits de corrosion sont détachés de la paroi de l'alvéole, puis raclés et enfin collectés dans le cendrier disposé au niveau de la hotte du robot de nettoyage.



Nettoyage des débris de produits de corrosion au sein d'un tronçon de chemisage

■ Le développement de composants hydrauliques à base d'eau pour limiter les départs de feu

*Témoignage(s)
Cyril Briancourt*

La maîtrise du risque incendie est un enjeu important et structurant de la conception des installations de Cigéo. Aussi une stratégie de diminution des risques d'occurrence des départs de feu a été définie, cherchant à éliminer ou réduire les produits inflammables, et réduisant autant que possible les sources de départ de feu potentielles.

Les composants hydrauliques fonctionnant avec des fluides aqueux, à point éclair élevé et de ce fait difficilement inflammables, ont été développés dans ce sens et pourraient, à terme, remplacer les composants hydrauliques fonctionnant avec des fluides à base d'huile, liquide considéré jusqu'à présent pour le fonctionnement de certains équipements des installations du stockage.

En 2016 un partenariat industriel a été monté avec la société Fluid Hydr'Eau, pour le développement d'un moteur hydraulique à eau. Ce moteur « lent », à pistons radiaux, permet d'obtenir des couples importants dans

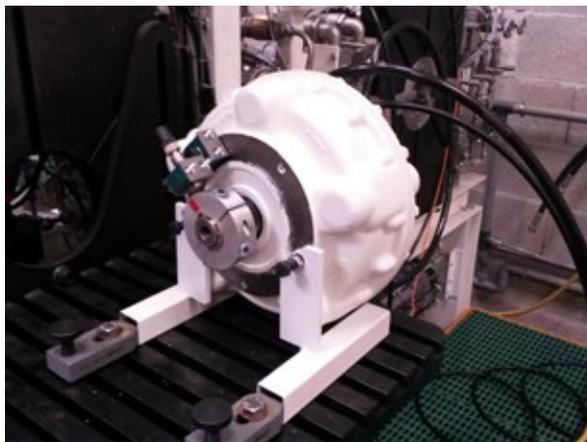
un encombrement intéressant, et des vitesses de rotation lentes, permettant de répondre aux exigences de vitesse des véhicules automoteurs en prise directe sur les roues.

Le développement de ce nouveau type de moteur fonctionnant avec un fluide à base d'eau passe par plusieurs étapes successives, l'objectif étant de répondre par partie aux problématiques identifiées, à savoir l'élimination des fuites, la corrosion et les frottements de glissement.

La première étape s'est soldée par un succès. Le 27 septembre 2016, le moteur modifié a tourné, sans couple résistant, pendant plusieurs minutes. L'étape suivante se décompose en deux phases :

1. la détermination des associations de matières anticorrosion permettant de résoudre les problèmes de frottement de glissements sous charge ;
2. la conception spécifique du prototype de moteur passant par la redéfinition de la distribution et des jeux de fonctionnement et prenant en compte la viscosité de l'eau (quarante fois inférieure à celle de l'huile).

À terme, un moteur à l'échelle 1 sera réalisé pour des essais grandeur nature sous charge et à pression de service de 350 bars.



Moteur hydraulique à eau



Cyril Briancourt
Ingénieur,
service Études Process Mécaniques,
direction de l'Ingénierie

Fin 2013, l'Andra a engagé des développements sur les mécanismes hydrauliques mus par fluide aqueux présentant un caractère ininflammable.

Cela s'est concrétisé notamment par la réalisation d'un banc d'essais polyvalent permettant de tester et d'éprouver différents composants hydrauliques, mus par les fluides aqueux à des pressions élevées (pompes, moteurs, vérins, distributeurs, appareils de régulation de débit, appareils de régulation de pression...).

Tout débute en 2014 par des essais réalisés sur le banc, à partir d'un moteur destiné à une utilisation en huile, et au cours desquels il est mis en exergue que la conception même du moteur (jeux importants, étanchéités sommaires ou inexistantes) s'avère inadaptée à la viscosité de l'eau. Le moteur ne monte pas en pression du fait des nombreuses fuites internes, et le débit au drain est très proche du débit d'entrée. Le rendement du moteur est presque nul et, par conséquent, le moteur n'est pas en capacité de générer un couple en sortie d'arbre.

Avec un positionnement idéal de l'excentrique de l'arbre moteur, le moteur tourne lentement puis s'arrête. Un mouvement est généré « par à-coups » en augmentant le débit d'entrée. Par ailleurs, ce moteur hydraulique à pistons radiaux est réalisé dans des matériaux qui ne résistent pas à la corrosion car ils sont étudiés pour un fonctionnement à l'huile et les frottements de glissement subis sont facilités par la lubrification du fluide d'alimentation.

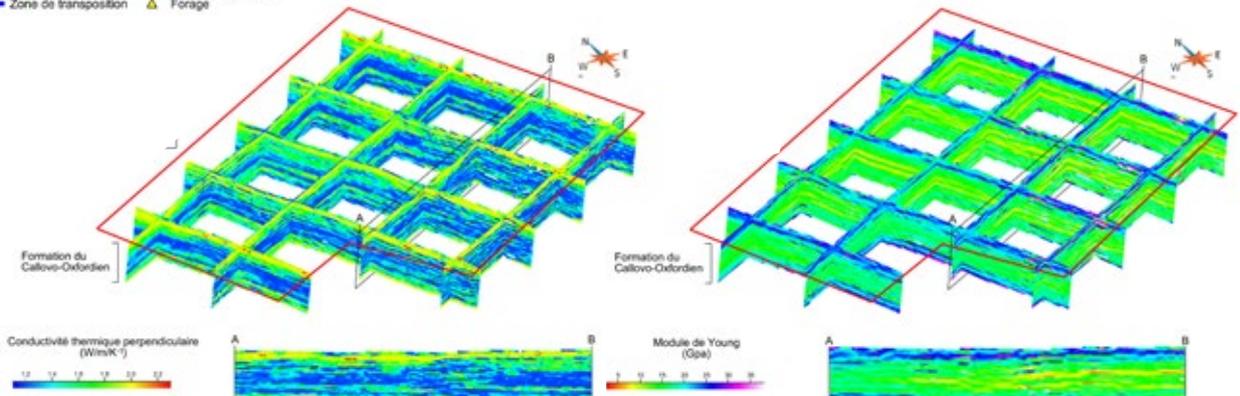
Le défi technologique semble toutefois surmontable et une réflexion est alors menée pour adapter ce moteur à un fluide aqueux. Ces réflexions ont conduit au partenariat avec l'entreprise Fluid Hydr'Eau.



La détermination du comportement thermo-hydro-mécanique de la formation du Callovo-Oxfordien en grand, pour le dimensionnement thermique des quartiers HA : distribution 3D des paramètres thermo-hydro-mécaniques de la formation du Callovo-Oxfordien sur la Zone d'Intérêt pour la Reconnaissance Approfondie (ZIRA)

Les travaux sur le comportement thermo-hydro-mécanique du Callovo-Oxfordien, nécessaires au dimensionnement des quartiers HA, s'appuient sur une analyse multi-échelle des caractéristiques thermiques (conductivités thermique), hydrauliques (perméabilités) et mécaniques (modules d'Young) du Callovo-Oxfordien sur la ZIRA.

En 2016, les données de la campagne de sismique 3-D menée en 2010 sur la ZIRA, couplées aux données acquises en forages, en laboratoire de surface sur les échantillons prélevés en forages, et au Laboratoire Souterrain, ont permis d'établir une cartographie des distributions 3D des paramètres mécaniques, hydrauliques et thermiques du Callovo-Oxfordien à l'échelle de la ZIRA (zone où seront implantées les installations fond de Cigéo), utilisées comme donnée d'entrée pour le dimensionnement des quartiers HA pour le Dossier de DAC de Cigéo.



Estimation actuelle des distributions 3D de la conductivité thermique (à gauche) et du module de Young dynamique (à droite) du Callovo-Oxfordien sur la ZIRA et de leurs variations spatiales selon une coupe AB ouest-est de 5 kilomètres de longueur

Béatrice Yven

Ingénieur en méthodes géophysiques,
service Monitoring et Traitement des
Données, direction de la Recherche
et Développement



L'évaluation des distributions spatiales des paramètres thermo-hydro-mécaniques du Callovo-Oxfordien sur la ZIRA, est le résultat de travaux de modélisation géologique menés depuis une dizaine d'années, qui associent de multiples disciplines scientifiques et des collaborations entre l'Andra et des partenaires/prestataires de tous horizons (public, privé, TPE et grand institut de recherche). Ces travaux reposent à la fois sur des données expérimentales de grande qualité, l'utilisation de méthodes performantes et robustes qui permettent de traiter ces données à toutes les échelles, pour en extraire des informations pertinentes et représentatives, et sur une connaissance approfondie et intime du contexte géologique du site du projet Cigéo et de son évolution passée sur cent cinquante millions d'années.

Le retour d'expérience de l'Andra durant les phases d'acquisition, de traitement et d'interprétation des données sismiques 2D/3D, a permis d'optimiser la capacité des données sismiques à permettre la détection d'éventuelles hétérogénéités structurales ou sédimentaires sur 1 000 mètres de profondeur.

À l'échelle globale de la ZIRA, le modèle paramétrique confirme l'organisation verticale des dépôts, leur continuité latérale, associée à une faible variabilité latérale de la formation.

La réalisation de nouveaux forages profonds sur le pourtour de la ZIRA, à partir de 2018, permettra de consolider plus encore le modèle en réduisant les quelques incertitudes résiduelles, et d'asseoir plus encore le choix du positionnement du stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien, et son architecture.



Darius Seyed

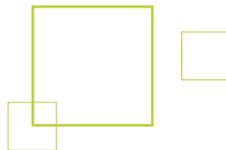
Ingénieur géomécanicien, service Mécanique des Fluides et des Solides, direction de la Recherche et Développement

L'augmentation de la température dans un milieu poreux peu perméable tel que le Callovo-Oxfordien, engendre une surpression d'eau porale, essentiellement à cause de la différence de coefficients de dilatation thermique entre cette eau porale et le squelette solide de l'argilite du Callovo-Oxfordien (environ un ordre de grandeur).

Cette augmentation de la pression interstitielle, combinée aux contraintes thermo-mécaniques engendrées dans la roche, affecte l'état des contraintes effectives, et, dans certains cas, pourrait provoquer des ruptures en cisaillement, ou de la fracturation.

Depuis 2005, nous menons un ensemble de travaux de recherche afin de mieux décrire l'effet d'une charge thermique sur la réponse thermo-hydro-mécanique des argilites. Des essais sur échantillons, des essais *in situ* à différentes échelles, et des travaux théoriques, ont permis de mettre en évidence les différents mécanismes en jeu. En se basant sur ces travaux, une stratégie de simulation du comportement thermo-hydro-mécanique en grand du Callovo-Oxfordien, en support au dimensionnement des quartiers HA a été mise en place, afin notamment de disposer d'un dimensionnement robuste pour le Dossier de DAC de Cigéo, sans préjuger des progrès de connaissances futurs, compte tenu du fait que la grande majorité des déchets exothermiques (déchets vitrifiés...) ne serait prise en charge dans Cigéo qu'à l'horizon 2075-2080. Pour la phase industrielle pilote de Cigéo, seul serait pris en charge un nombre limité de déchets exothermiques,

les déchets vitrifiés historiques (HA0), par ailleurs les moins chauds, dans le cadre d'un quartier HA0, pilote des futurs quartiers des verres les plus chauds (HA1/HA2). Les investigations réalisées à l'échelle de la ZIRA ont montré une distribution spatiale 3D des paramètres thermo-hydro-mécaniques. Une variabilité verticale relativement marquée, liée aux unités litho-stratigraphiques du Callovo-Oxfordien, et une variabilité latérale moins marquée, dans chaque unité, ont été observées. Des simulations thermo-hydro-mécaniques ont été réalisées afin d'évaluer l'influence de ces variabilités et de l'échelle spatiale de leur représentation, dans les simulations sur le dimensionnement thermique des quartiers HA. Une analyse complète de sensibilité multiparamétrique déterministe et probabiliste, est prévue en 2017-2018, afin de déterminer les influences respectives de chacun des paramètres sur la réponse thermo-hydro-mécanique du Callovo-Oxfordien. Ces travaux seront accompagnés par la réalisation d'un nouvel essai thermique dans le Laboratoire Souterrain de Bure : il nous permettra, d'une part, d'étudier la réponse thermo-hydro-mécanique du Callovo-Oxfordien à une échelle plurimétrique, sous un chemin de chargement thermique et thermo-hydro-mécanique, représentatif de celui autour d'un quartier HA afin notamment d'évaluer dans un premier temps l'absence d'occurrence de l'initiation d'une fracturation des argilites, et si possible, dans un deuxième temps, les conditions d'une telle occurrence.



La maîtrise de la corrosion des chemisages et conteneurs métalliques HA

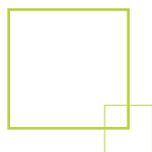
Le matériau de remplissage à base cimentaire, prévu entre le chemisage métallique et la roche, a pour objectif de neutraliser l'acidité transitoire issue de l'oxydation des argilites en paroi, lors du creusement des alvéoles HA, et de limiter ainsi les cinétiques de corrosion du chemisage et des conteneurs en acier bas carbone.

Deux essais de corrosion importants ont été mis en œuvre en 2016 dans le Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne, afin d'évaluer en condition *in situ*, les cinétiques de corrosion des nuances d'aciers bas carbone, retenues respectivement pour le chemisage et les conteneurs HA, en présence d'un matériau à base de ciment, en interface avec la roche. Sur la base du retour d'expérience des essais de corrosion déjà conduits au Laboratoire Souterrain, la durée prévue pour ces essais est de quatre ans afin de bien appréhender l'évolution de la cinétique de corrosion dans le temps et s'assurer de l'effet de limitation de ces cinétiques, par le matériau cimentaire.

En parallèle, des essais en laboratoire de surface ont aussi été engagés, notamment afin d'étudier les types de corrosion (généralisée ou localisée) et les cinétiques de corrosion, sur un large domaine de paramètres d'environnement du stockage (température, présence ou non d'oxygène, évolution de la chimie de l'eau, radiolyse, micro-organismes...).

Ces essais doivent permettre de consolider la compréhension des mécanismes de corrosion, l'objectif étant d'extrapoler ces mécanismes aux durées séculaires requises pour le chemisage et les conteneurs HA, notamment en faisant appel à la simulation numérique, à partir de codes couplant corrosion et géochimie.

Ces mécanismes de corrosion sont aussi étudiés sous contraintes mécaniques, afin de s'assurer de l'absence d'une fissuration précoce ou de la propagation d'une éventuelle fissuration sous l'effet couplé corrosion/mécanique.



Didier Crusset

Ingénieur spécialiste de la corrosion,
service Colis et Matériaux, direction de
la Recherche et Développement



L'année 2016 a été une année très active, dédiée à la mise en place de nombreuses expérimentations et modélisations sur la corrosion et le comportement mécanique des composants métalliques des stockages, particulièrement dans le contexte de l'alvéole HA. Celles-ci sont réalisées dans le cadre d'un « Groupement de Laboratoires » qui comprend une quinzaine de laboratoires, d'organismes de recherche (CEA, EDF, IFPEN), du CNRS et d'écoles d'ingénieurs, ainsi que des laboratoires industriels (Institut de la Corrosion, CETIM).

La pluridisciplinarité et la complémentarité des laboratoires, permettent à l'Andra et aux laboratoires, de bénéficier de compétences multiples et interactives sur un vaste domaine couvrant l'ensemble des processus de corrosion et de comportement mécanique des aciers.

Les études et les expérimentations sont réalisées de l'échelle nanométrique de certaines couches protectrices de corrosion, jusqu'à la taille réelle d'un composant (comportement mécanique des chemisages). Elles abordent expérimentalement tous les modes de corrosion envisagés (corrosion généralisée, localisée, sous rayonnement ou sous contrainte...) et d'endommagement mécanique. Le développement de la modélisation de l'ensemble de ces processus permet d'aborder des échelles de temps inaccessibles à l'expérimentation. Des sujets prospectifs sont également traités, comme les revêtements métalliques, la protection cathodique et les nouvelles techniques de mesure de la corrosion.



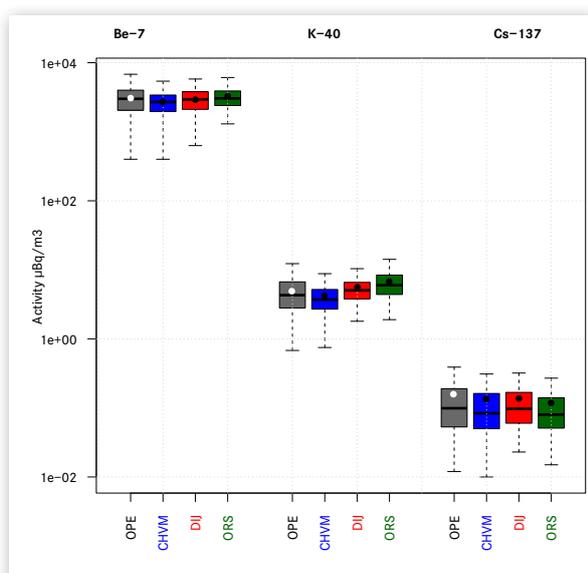
Cellule électrochimique pour mesure de vitesse de corrosion

Le suivi radiologique atmosphérique de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE)

Depuis 2011, l'Andra réalise, grâce à la station atmosphérique de l'OPE à Houdelaincourt, un suivi radiologique atmosphérique, à l'aide des prélèvements des retombées totales (dépôt sec et humide) des phases gazeuses (carbone 14 et tritium) et solides (aérosols). Ces suivis permettent d'améliorer la connaissance des niveaux radiologiques dans l'atmosphère et de mesurer les variabilités des niveaux enregistrés dans une zone représentative de l'environnement de Cigéo. La station atmosphérique de l'OPE fait notamment partie du réseau national de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), le réseau OPERA-Air (Observatoire PERmanent de la RAdioactivité de l'IRSN), ce qui permet de garantir une caractérisation pertinente et objective.

Vingt radionucléides d'origine naturelle et artificielle sont recherchés dans les aérosols comme par exemple, le thorium 234, le potassium 40, le césium 137. Le strontium 90, le plutonium 239, le plutonium 240 ou l'américium 241 ainsi que les isotopes de l'uranium, présents à l'état d'ultra-traces sont également recherchés.

Les niveaux d'activité de trois radionucléides, naturels et artificiels, permettant d'apprécier l'influence, le cas échéant, d'activités industrielles, sont mesurés à la station OPE de Houdelaincourt, et comparés à ceux des stations d'OPERA-Air à Charleville-Mézières (CHVM), Dijon et Orsay. Ces radionucléides sont (i) le césium 137, radionucléide artificiel provenant des essais nucléaires atmosphériques, des rejets accidentels et du cycle du



Comparaison des activités (µBq/m³) en Be-7, K-40 et Cs-137 mesurées par les stations atmosphériques d'Houdelaincourt, d'OPERA-Air à Charleville Mézières (CHVM), de Dijon (DIJ) et d'Orsay (ORS) sur la période 2012-2016

Sébastien Conil

Ingénieur en environnement, service
Géologie et Environnement de surface,
direction de la Recherche et
Développement



Nous réalisons un suivi du fond radiologique atmosphérique sur la station de Houdelaincourt, depuis fin 2011. Ces données permettent de caractériser les niveaux moyens d'activités, ainsi que les variabilités saisonnières, et de les comparer avec ceux d'autres stations du réseau national de l'IRSN et du réseau européen d'experts Ring of Five (Ro5). Ces comparaisons indiquent d'abord un fond radiologique typique d'une zone non impactée par des activités nucléaires. Elles montrent également que les variations saisonnières et interannuelles, sont cohérentes avec celles des autres stations du quart nord-est de la France. Le dispositif permet aussi la détection d'anomalies liées à des événements météorologiques particuliers ou à des incidents. Ainsi par exemple en novembre 2011, des traces d'iode 131 sous forme particulaire dans l'air, sans risque sanitaire, ont été mesurées sur certains prélèvements. L'analyse des trajectoires des masses d'air et des données du réseau de mesure européen ont permis à l'IRSN et à l'AIEA, de déterminer que la source d'iode 131 détectée était très probablement un rejet dans l'atmosphère provenant de l'Institut des Isotopes (Institute of Isotopes Ltd.), situé à Budapest, en Hongrie.

Ce dispositif conçu pour un monitoring à long terme du fond radiologique, pourra être couplé au suivi radiologique de Cigéo, pour la détection d'événements particuliers sans lien avec Cigéo, mais à plus grande échelle, au sein du réseau IRSN et Ro5.

combustible, (ii) le béryllium 7 d'origine cosmogénique, et (iii) le potassium 40, présent dans les roches et dans de nombreux compartiments de la biosphère dont le corps humain ; ces deux derniers radionucléides étant d'origine naturelle.

L'année 2016 a été l'occasion d'un premier bilan, après plus de six ans de fonctionnement. Au-delà des résultats de mesures qui témoignent de la présence de ces trois radionucléides dans l'atmosphère à l'état de traces, et de leurs concentrations, caractéristiques d'un site hors influence industrielle, ce bilan souligne aussi la qualité et la reproductibilité des mesures.

La nature et l'exhaustivité des mesures de la station atmosphérique de Houdelaincourt permettent ainsi de disposer d'un référentiel ambiant avant toute construction de Cigéo.

La maîtrise du cycle biogéochimique de radionucléides, pour déterminer le risque d'accumulation ou de toxicité dans l'environnement des stockages : le projet AMORAD sur l'aide au paramétrage du transfert des radionucléides dans l'environnement

Le projet AMORAD (Amélioration des MODèles de prévisions de la dispersion et de l'évaluation de l'impact des RADionucléides au sein de l'environnement), coordonné par l'IRSN, est lauréat de l'appel à projets ANR RSNR (Recherche en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection). L'axe « CYCL » (cycle biogéochimique des radionucléides en écosystèmes forestiers), au sein du projet AMORAD, est coordonné par l'Andra. Les activités de R&D se déploient sur la période 2013-2019 et impliquent le monitoring de trois sites d'études dont une station « forêts » de l'OPE pour un suivi particulier du cycle du césium et de l'iode en écosystème forestier.

Après trois ans de fonctionnement du projet AMORAD, l'année 2016 a été marquée par le développement et le calibrage d'un modèle, pour représenter le cycle du césium en écosystème forestier (TRIPS : *Transfer of radionuclides in perennial vegetation systems*) et analyser le rôle des facteurs environnementaux qui influencent sa distribution et son temps de résidence dans le système. Le modèle TRIPS fait la différence entre la contamination par voie foliaire et par voie racinaire. La représentation d'un prélèvement racinaire se base sur une description quantitative fine du cycle, qui tient compte implicitement des phénomènes de translocation internes. Ce modèle doit permettre de traiter de manière fine les différents scénarios de contamination potentielle d'origine atmosphérique ou souterraine.

Très présent dans l'environnement du projet Cigéo et d'autres sites de stockage envisagés de par le monde, l'écosystème forestier est de fait un écosystème important :

- de par sa biomasse, il possède une capacité élevée d'interception des retombées atmosphériques, et est un lieu d'interactions importantes entre le cycle de l'eau et celui des éléments ;
- il est un système naturel qui prédomine en absence d'occupation du territoire par l'homme, notamment en périodes froides envisagées dans le futur et dans des scénarios de biosphère type retenus pour les calculs d'impact à long terme des stockages ;

Yves Thiry

Ingénieur en radio-écologie,
service Transferts, direction
de la Recherche et Développement



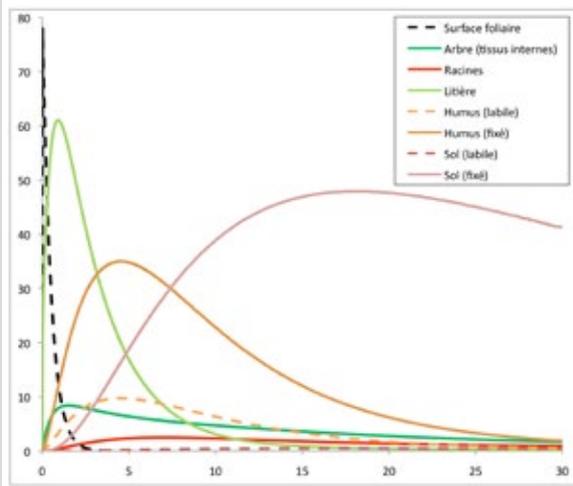
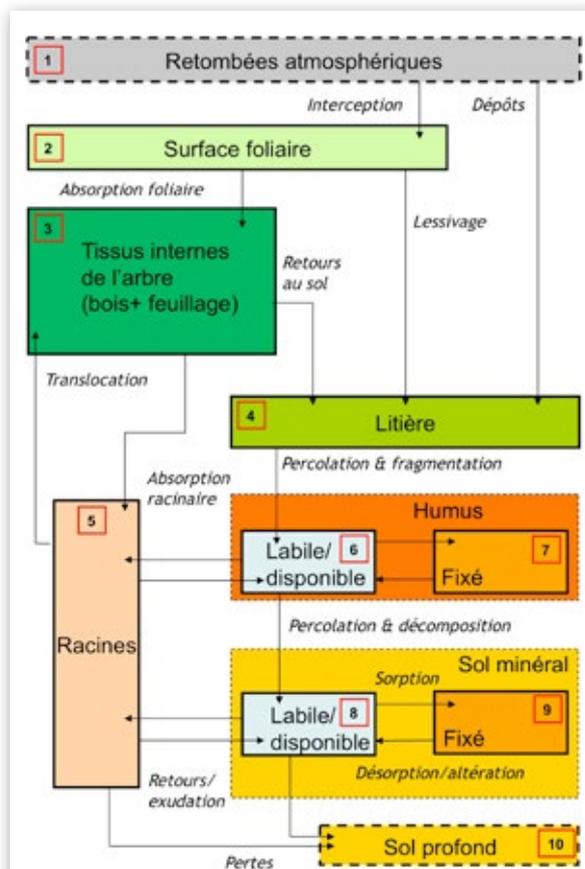
Les contaminations chroniques bas-niveaux et les longues échelles de temps sont des données importantes quand on envisage les risques d'exposition à long terme autour d'installations nucléaires, notamment autour des stockages. Pour éviter de sous-estimer ces risques, les modèles radio-écologiques classiquement utilisés pour le calcul d'impact, se basent le plus souvent sur des concentrations totales et adoptent une vision simplifiée des phénomènes de redistribution des contaminants potentiels dans des systèmes à l'équilibre, ainsi qu'une stratégie prudente de sélection des valeurs de transfert par une approche pénalisante. Cette démarche est, avant tout, dictée par la réglementation et des critères de radioprotection. *De facto*, elle ne donne pas une information précise quant à l'accumulation ou à la biodisponibilité ou toxicité avérée des contaminants potentiels (sélénium 79, chlore 36, iode 129, carbone 14, tritium, radium 226, césium 135, bore, arsenic ...), pour distinguer les empreintes historiques ou quantifier les marges de sûreté.

Les travaux de recherche sur une description plus mécanistique du cycle biogéochimique de radioéléments dans des écosystèmes naturels typiques, visent à développer des modèles de radio-écologie dynamiques réalistes, s'appuyant sur une représentation des flux, comme outils en support, non seulement aux études d'impact radiologiques, enveloppes par nature, mais aussi au dialogue avec les parties prenantes, notamment locales.

- les longues échelles de temps qui caractérisent les évaluations des impacts radiologiques d'un stockage en après fermeture notamment (de plusieurs centaines d'années au million d'années pour Cigéo) sont similaires à celles du fonctionnement de l'écosystème forestier. Le caractère pérenne de l'écosystème forestier en fait donc un bon milieu, pour étudier le comportement à long terme des toxiques chimiques ou de radionucléides de longue période.

Par ailleurs, l'Andra a mis à disposition du projet AMORAD et de ses partenaires, un modèle d'échantillonnage et de calcul des flux, dimensionné pour documenter le cycle des éléments sur des échelles de temps longues. Ces activités trouvent un écho dans le cadre plus large des études de

bio-géochimie des éléments traces. Elles représentent un tremplin pour aborder des questions non résolues sur le comportement de marquages anciens (retombées des tests militaires atmosphériques, retombées de Tchernobyl), pour traiter les interactions complexes sol/végétation/atmosphère, ou préciser le risque potentiel d'accumulation des radionucléides à long terme dans l'environnement naturel proche des centres, sous différentes conditions climatiques.



Structure du modèle TRIPS et simulation sur une période de trente ans de la redistribution du radiocésium entre les compartiments d'un peuplement de pin sylvestre suite à un dépôt atmosphérique aigu hypothétique de 100 Bq.ha⁻¹

2016, UNE ANNÉE DE POURSUITE DE LA R&D POUR AFFINER LA CONNAISSANCE DES CARACTÉRISTIQUES DE LA FORMATION GÉOLOGIQUE, SUR LE SITE ENVISAGÉ POUR LE PROJET DE STOCKAGE DE DÉCHETS FA-VL

La caractérisation des propriétés physico-chimiques de la formation des Argiles tégulines

Témoignage(s)
Jean-Charles
Robinet

Sur la base des acquisitions de terrain menées en 2013-2015 sur le secteur de la communauté de communes de Venduvre-Soulaines (Aube), un travail d'intégration poussé a été entrepris en 2016, afin de bien représenter la zonation des Argiles tégulines depuis la surface, conséquence de phénomènes d'altération supergène. Mise en évidence par la combinaison des différentes données, cette zonation est principalement marquée par une évolution du potentiel redox et de la chimie des eaux depuis la surface vers la profondeur.

Les méthodes développées pour les argilites du Callovo-Oxfordien dans le cadre du projet Cigéo, telles que la caractérisation des gaz dissous par dégazage,

Jean-Charles Robinet
Chef du service Transfert
(des radionucléides et toxiques
chimiques), direction de la
Recherche et Développement



Une bonne connaissance de l'environnement géochimique des formations géologiques est nécessaire pour comprendre et quantifier les phénomènes de transfert qui régiront la migration des radionucléides depuis les colis de déchets. L'étude d'une formation argileuse en conditions de sub-surface, telles que les Argiles tégulines, nécessite d'utiliser des approches de caractérisation différentes de celles qui ont été mises en place pour les Argilites du Callovo-Oxfordien. Néanmoins, grâce aux développements sur la caractérisation des eaux, réalisés en partenariat de recherche avec le BRGM depuis de nombreuses années, nous disposons d'outils analytiques et numériques innovants et performants, qui nous permettent aujourd'hui de quantifier l'effet des phénomènes d'altération sur les propriétés physico-chimiques des Argiles tégulines.

ont été utilisées dans le cadre d'une application élargie afin de caractériser finement le système géochimique, et ainsi identifier les mécanismes potentiels à l'origine des phénomènes d'altération. La mise en place du profil d'altération serait ainsi liée à la pénétration de l'oxygène atmosphérique et à la réactivité de cet oxygène avec les divers composants réducteurs des Argiles téglines (pyrite, matières organiques...) qui vont tamponner les conditions redox en consommant l'oxygène, et influencer sur la chimie des eaux. Les travaux entrepris depuis 2013 vont se poursuivre en 2017-2018 avec pour objectif de mieux caractériser les transferts de traceurs naturels dans les Argiles téglines, et d'élaborer un modèle géochimique de régulation de la chimie des eaux, en tenant compte des échanges de fluides avec l'atmosphère.

Ces travaux sur la caractérisation des propriétés physico-chimiques de la formation des Argiles téglines sont réalisés en laboratoire, dans le cadre d'un projet en partenariat de recherche avec le BRGM: le projet OXGAULT.

Ce projet a pour objectif de caractériser la chimie des eaux et les interactions fluide-roches dans les Argiles téglines, en ciblant une zone de roche d'une épaisseur de vingt mètres à partir de la surface, dont les propriétés physico-chimiques ont pu être modifiées par les échanges actuels ou passés avec l'atmosphère. À partir d'échantillons carottés prélevés dans des forages réalisés en 2015, le BRGM a mis en œuvre un ensemble important d'analyses, afin de décrire les principales évolutions minéralogiques, pétrographiques et pétrochimiques des Argiles téglines depuis la surface.



UNE R&D AU SERVICE DE LA MAÎTRISE DU FONCTIONNEMENT DES CENTRES DE SURFACE [CENTRE DE STOCKAGE DE L'AUBE (CSA) ET CENTRE DE STOCKAGE DE LA MANCHE (CSM)]

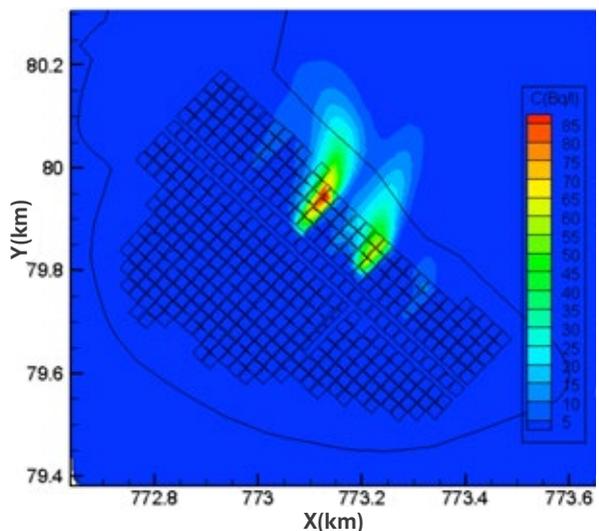
2016 est une année à la fois de capitalisation des travaux de R&D, en appui au réexamen de sûreté du CSA remis cette même année, et de poursuite des travaux de R&D, en appui au prochain réexamen de sûreté du CSM prévu en 2019.

Les évaluations de performance et de sûreté du réexamen de sûreté 2016 du CSA

Témoignage(s)
Denis Perraud

Les évaluations de performance et de sûreté s'appuient à la fois sur l'évolution des connaissances scientifiques (caractérisation des mécanismes, processus et données) et sur les données relatives au suivi des ouvrages et à la surveillance de l'environnement.

Ces évaluations portent sur (i) les performances de confinement des colis (matrices, enveloppes durables, éventuel surenrobage) et des composants ouvragés (radier, voiles, dalles, béton de remplissage des ouvrages bétonnés), (ii) la dégradation mécanique et chimique des matériaux cimentaires au cours du temps, (iii) les écoulements dans les sables de l'Aptien sur lesquels sont disposés les ouvrages de stockage, ainsi que les propriétés de transfert des solutés vers



Simulation de la répartition de la concentration en iode 129 dans la nappe aquifère sous la plateforme de stockage du CSA peu après le début de la phase de post-surveillance

les exutoires, et (iv) le comportement hydromécanique de la couverture placée sur les ouvrages.

Sur la base notamment des travaux de recherche menés depuis plusieurs années, du retour d'expérience quant à l'observation du fonctionnement du centre, et de l'amélioration des outils de simulation numérique, l'évaluation de performance et de sûreté, réalisée en vue du réexamen de sûreté, a fait l'objet d'évolutions importantes en 2016, par rapport à celle conduite lors du rapport de sûreté en 2004 :

- la dégradation mécanique et chimique progressive des matériaux cimentaires constitutifs des colis et des ouvrages, a été traduite au travers d'une évolution progressive par palier, des propriétés hydro-dispersives (conductivité hydraulique, coefficient de diffusion effectif, porosité), et de rétention (coefficient de partage solide/solution K_d), gérée en 2004 dans une seule évaluation ;
- à l'échelle de la nappe, une modélisation 3D des écoulements (trajectoires) et du transfert de solutés dans la nappe jusqu'aux exutoires, a permis de décrire des panaches de concentration en iode 129 reflétant directement la distribution spatiale de l'inventaire au sein des ouvrages existants.

Denis Perraud
Ingénieur calculs de sûreté,
service Évaluation et Analyse
de Performance, direction
de la Recherche et Développement



Grâce à l'évolution des connaissances acquises depuis l'examen de sûreté précédent (RDS 2004), l'Andra a amélioré de façon importante la représentation physique et numérique pour l'évaluation de performance et de sûreté du CSA. Par exemple, à l'échelle du colis et de l'ouvrage, la dégradation mécanique et chimique des matériaux cimentaires a été représentée selon une évolution progressive des paramètres de transfert ; à l'échelle de la nappe, les différents états hydrauliques représentatifs des phases de vie du stockage (surveillance, post-surveillance) sont représentés par un enchaînement continu des modèles hydrogéologiques.

L'intégration de ces choix conceptuels en qualité, dans un même environnement (chaîne de calculs), a conduit à une évaluation intégrée et détaillée du relâchement et du transfert des solutés depuis les colis de déchets jusqu'aux exutoires, et à la maîtrise des différents indicateurs intermédiaires permettant de quantifier le rôle de chaque composant.

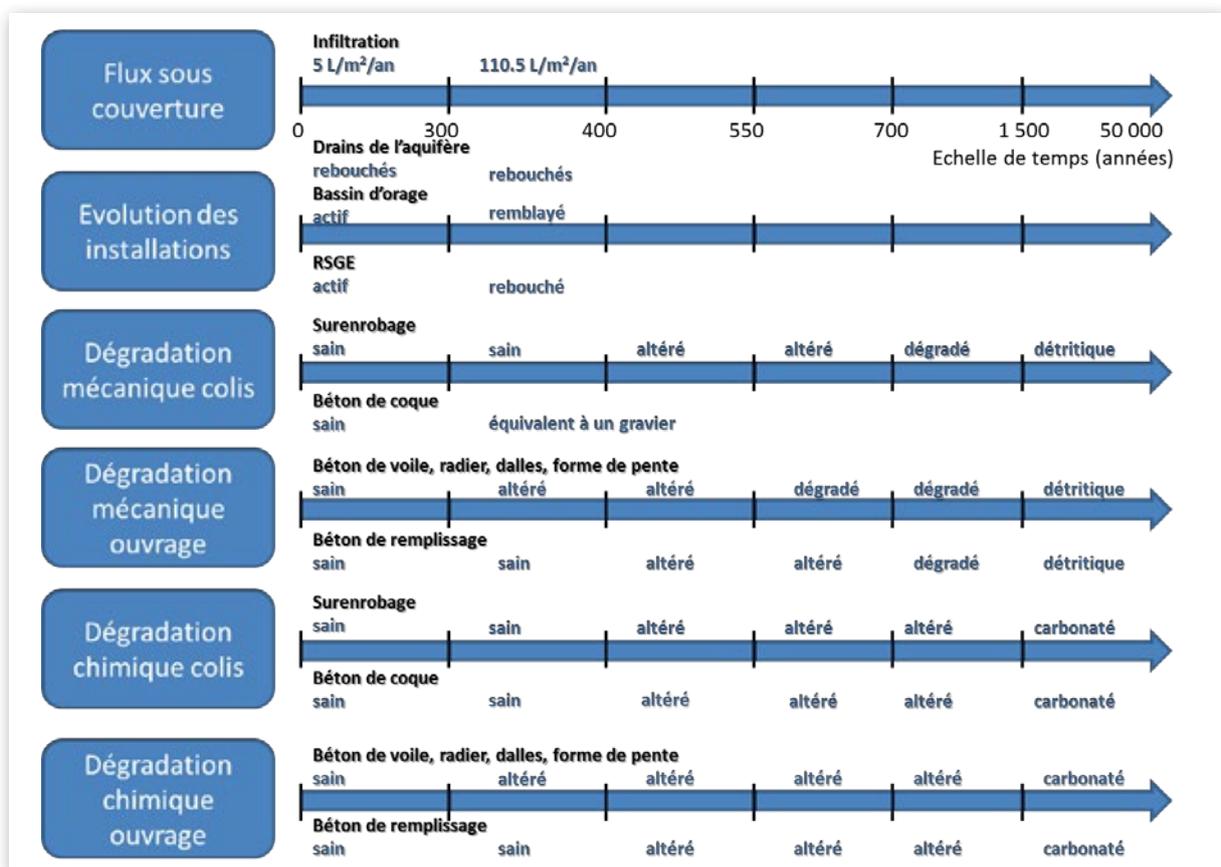


Schéma de l'évolution dans le temps des installations du stockage et des composants cimentaires des ouvrages du CSA, retenu pour les évaluations de performance et de sûreté

L'ensemble des évaluations de transfert des solutés par la voie eau, en phase après fermeture, des scénarios d'évolution normale et altérée, indique que les impacts radiologiques restent toujours inférieurs à l'objectif de protection radiologique assigné au type de scénario considéré (0,25 mSv/an en évolution normale, 10 mSv/an en évolution altérée), avec comme principaux contributeurs les radionucléides à vie moyenne ou longue (chlore 36, molybdène 93, carbone 14, iode 129, technétium 99...). La représentation fine du transport montre clairement que l'ensemble des radionucléides à vie courte est totalement atténué par les ouvrages, du fait des temps de transfert associés permettant une atténuation par décroissance radioactive. Enfin, les radionucléides à vie longue, incluant la plupart des actinides des chaînes de filiation, ont un relâchement vers la nappe très atténué du fait de leur rétention dans les matériaux cimentaires.

Ces évaluations de performance et de sûreté ont par ailleurs été mises au standard d'assurance qualité de Cigéo : une chaîne de calculs intégrant toutes les étapes de l'évaluation (de la lecture des données physico-chimiques à la génération des résultats) a été mise en place, et ce pour les différents scénarios d'évolution du stockage. Cette chaîne de calculs permet de traiter tous les scénarii de sûreté dans un environnement unifié, de manière robuste et avec un contrôle renforcé des résultats intermédiaires.

Témoignage(s)
Sandra Jenni

L'actualisation du modèle hydrogéologique du CSM

En prévision du réexamen de sûreté du CSM en 2019, et dans une logique d'amélioration continue, le modèle hydrogéologique du Centre de stockage de la Manche a été actualisé, afin notamment de bénéficier du retour d'expérience des observations. De nombreuses améliorations ont été apportées :

- la représentation géologique 2D est remplacée par une représentation 3D permettant d'intégrer la variabilité verticale des formations géologiques et donc des propriétés hydrodynamiques de ces dernières ;
- l'extension verticale du modèle a été étendue car même si les écoulements se développent principalement à proximité de la surface, les transferts de solutés peuvent avoir lieu plus profondément ;
- la prise en compte des effets potentiels de l'altération sur les écoulements et les transferts a été rendue possible par une discrétisation verticale adaptée aux profondeurs d'altération relevées aux forages.

Sandra Jenni

Ingénieur hydrogéologue,
service Évaluation et Analyse de
Performance, direction de la Recherche
et Développement

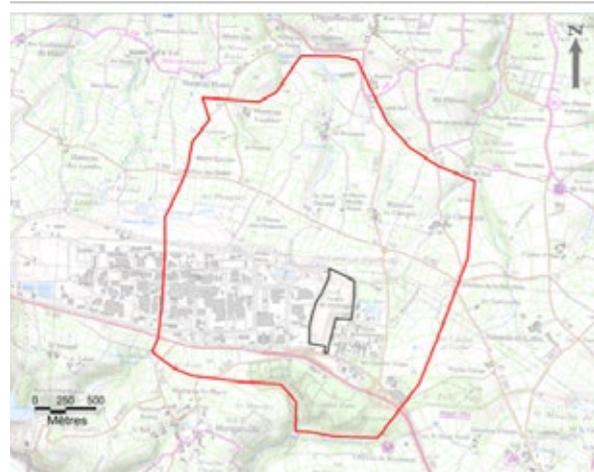


Dans le cadre de la préparation du réexamen de sûreté du CSM en 2019, nous avons mené une actualisation du modèle hydrogéologique et de transfert de solutés, de l'aquifère du CSM.

Cette actualisation bénéficie d'améliorations liées à l'intégration des observations de site depuis le dernier modèle de 2009, l'évolution des connaissances du fonctionnement des aquifères de socle, et d'un point de vue numérique, la capacité à mieux représenter en 3D le détail des systèmes aquifères. Les premiers résultats du modèle hydrogéologique ainsi amélioré, indiquent une meilleure précision que le précédent modèle, et permettent également une analyse plus fouillée des incertitudes associées à l'influence des hétérogénéités de l'aquifère sur son fonctionnement hydrodynamique.

Le calage du modèle hydrogéologique sur les chroniques de quatre-vingt-dix-sept piézomètres sur la période 1997- 2014 a permis de réduire les écarts entre les mesures et les résultats de simulation, renforçant ainsi la robustesse du modèle. L'étude de la cohérence de la simulation avec les observations issues de la surveillance du centre a également permis d'analyser les incertitudes de caractérisation du site et les acquisitions supplémentaires permettant de les réduire.

Le site de La Hague est situé dans le massif armoricain ; il repose sur des roches sédimentaires très anciennes, métamorphisées et remaniées au cours des différentes orogénèses les ayant affectées.



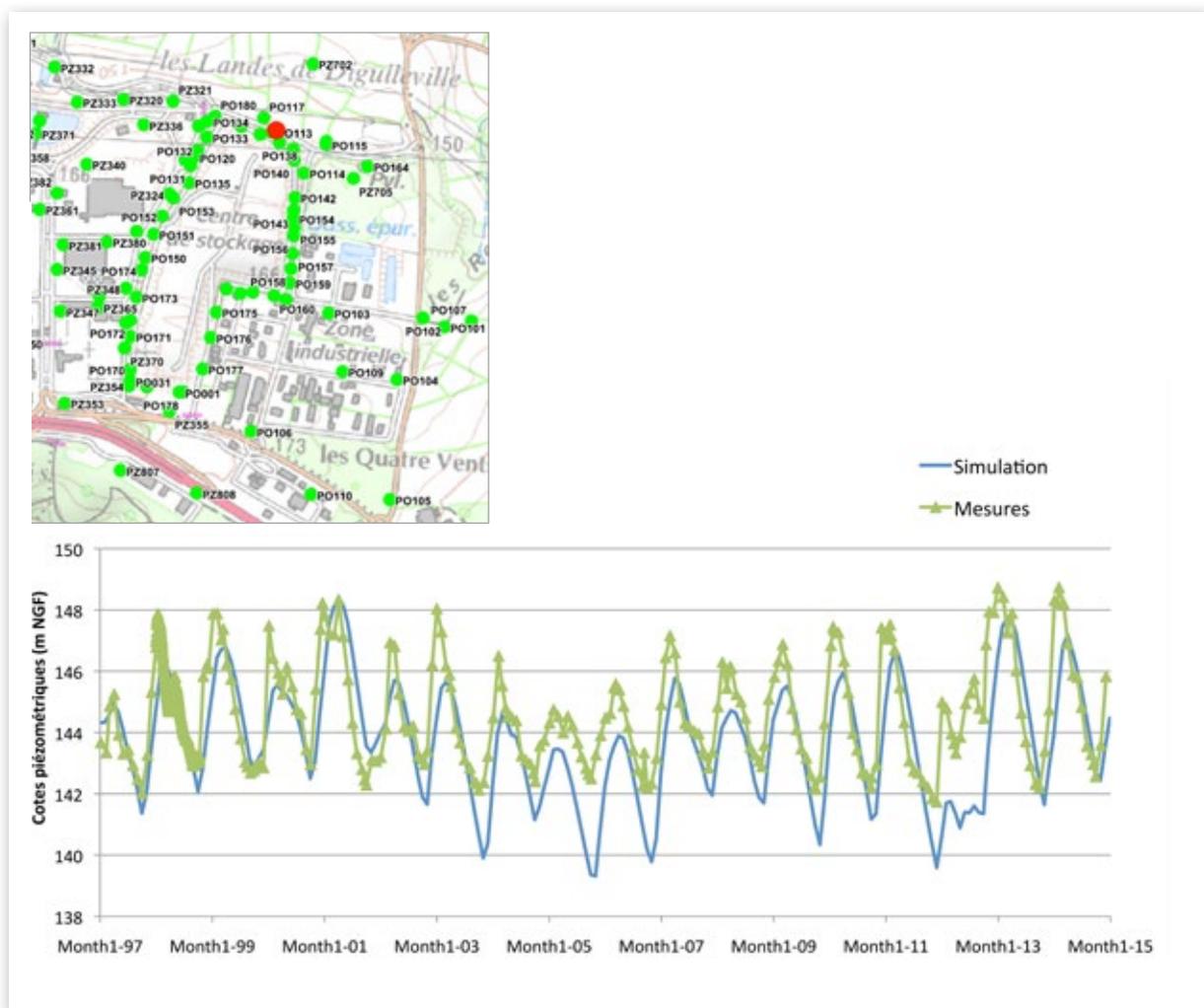
Zone modélisée pour l'actualisation du modèle hydrogéologique du CSM (en noir)

En raison de cette histoire géologique, la configuration des formations au droit du site est complexe. Ces dernières sont plissées et fracturées, et l'orientation actuelle des strates sédimentaires est subverticale. Les formations schisteuses sont altérées en argiles, et les formations gréseuses en sables.

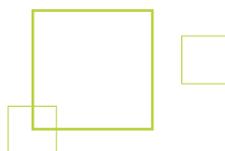
La nappe libre au droit du site présente des directions d'écoulement s'orientant depuis le point haut situé au sud du CSM vers le nord, où cette dernière est drainée par les thalwegs des cours d'eau intermittents ou pérennes. Les variations piézométriques observées reflètent les variations saisonnières de la recharge et les variations interannuelles des conditions

climatiques. Les travaux de suivi hydrogéologique réalisés depuis les années 1970 ont mis en évidence l'influence de la structuration géologique du sous-sol sur les écoulements souterrains, ainsi que celle de la construction du site. Les bâtiments à radier drainant du site AREVA voisin, ont contribué à une baisse des niveaux de quelques mètres par rapport à l'état naturel.

L'extension de la zone modélisée, d'environ 6 km², englobe une partie du site industriel AREVA. Elle a été déterminée de façon à pouvoir introduire des conditions aux limites cohérentes avec le fonctionnement du système aquifère.



Exemple de comparaison de chroniques mesurées et de chroniques simulées avec le modèle hydrogéologique actualisé entre 1997 et 2015



UNE R&D INNOVANTE POSITIONNÉE SUR DES THÉMATIQUES « AMONT » DU STOCKAGE

Témoignage(s)
Laurence Petit

L'appel à projets sur l'optimisation de la gestion des déchets radioactifs issus du démantèlement des installations nucléaires

Près de quatre-vingt-dix projets ont été soumis en réponse à l'appel à projets Andra sur l'optimisation de la gestion des déchets radioactifs issus du démantèlement des installations nucléaires. Organisé en coopération avec l'ANR et avec le soutien du programme d'Investissements d'Avenir, l'appel à projets Andra a pour objectif de faire émerger des initiatives innovantes pour optimiser, en amont du stockage, la gestion des déchets radioactifs issus du démantèlement des installations nucléaires. L'appel à projets a été organisé en deux éditions, lancées respectivement fin 2014 et fin 2015. Vingt-neuf projets ont été sélectionnés ; ils seront financés à hauteur de près de 40 millions d'euros. La majorité de ces projets a été lancée en 2016, pour une fin à l'horizon 2021.

Parmi les vingt-neuf projets retenus, plusieurs thématiques structurantes répondent à des besoins identifiés pour l'optimisation de la gestion des déchets de démantèlement : recyclage des déchets (en particulier TFA), traitement/conditionnement des déchets difficiles à prendre en charge en stockage, voire sans exutoire, optimisation des mesures radiologiques et des contrôles colis.

Du point de vue des acteurs mobilisés, ces projets impliquent très largement le tissu de PME françaises, avec un taux de participation supérieur à 80 % dans les projets de recherche appliquée. Une implication croissante d'acteurs hors nucléaire (Thales, Séché, MTB...) a également été constatée, permettant, conformément aux objectifs fixés pour cet appel, de favoriser la transposition, à la gestion des déchets radioactifs, de technologies développées dans d'autres secteurs d'activité.

Outre le suivi administratif et financier, chaque projet soutenu dans le cadre de l'appel à projets fait l'objet d'un suivi scientifique et technique détaillé, par un ou plusieurs experts de l'Andra. Un travail conséquent de communication et de valorisation des projets soutenus est également en cours (colloques, vidéos, réseaux sociaux, veille technologique internationale...).

Laurence Petit

chef du service Innovation,
direction du Développement de
l'Innovation et de l'International



L'objectif de l'Andra, *via* cet appel à projets, est double : élargir le positionnement de l'Andra en amont du stockage pour couvrir toute la chaîne de gestion des déchets de démantèlement sans se substituer aux exploitants des installations, mais également promouvoir la participation d'acteurs industriels et académiques de tous horizons, en particulier des PME et des acteurs hors nucléaire. À l'issue des deux éditions de l'appel à projets, ces objectifs sont largement atteints.

Les premiers projets sont lancés depuis un an environ et l'on compte déjà de belles réussites. Ainsi, le projet TEMPORAL, porté par la TPE Damavan Imaging, a déjà pu mettre en place un premier prototype de ce qui devrait à terme être une caméra gamma de nouvelle génération, présentant des propriétés sensiblement améliorées par rapport aux caméras existantes, en termes de rapidité de mesure, de sensibilité et de coût. Deux brevets et deux logiciels ont d'ores et déjà été déposés, depuis le début du projet. Outre l'utilisation sur les chantiers de démantèlement, des applications au secteur médical (scanners) sont envisagées.

Autre exemple, cette fois-ci en recherche fondamentale : le projet CADET. Ce projet, porté par l'Institut Jean Le Rond D'Alembert (Université Paris VI), propose de développer un procédé pour dégrader les complexants organiques contenus dans les liquides de nettoyage/rinçage des surfaces contaminées par la radioactivité (cuve, tuyauteries...). Ce procédé utilise pour cela de manière innovante le phénomène de « cavitation » : des « bulles de cavitation » sont formées au sein de fluides à traiter *via* une variation de pression, créant localement des conditions extrêmes de pression, de température et de turbulences. Celles-ci vont accélérer les réactions chimiques dans leur entourage (formations de radicaux oxydants), et permettre ainsi de dégrader, de manière très rapide et efficace, les composés organiques. Outre l'application au secteur nucléaire, ce procédé pourrait être mis en œuvre pour le traitement d'effluents industriels contenant des composés organiques réfractaires aux techniques de gestion existantes (pesticides, composés organiques halogénés, molécules pharmaceutiques ou cosmétiques...). Les premiers résultats obtenus sont particulièrement prometteurs. Le projet a été sélectionné dans le cadre du concours « Ma thèse en 180 secondes¹ ».

1. https://www.youtube.com/embed/xZz_ycXNSzY, organisation CPU, CNRS et Sorbonne Université

Le projet d'incinération et de vitrification « in can » des déchets de moyenne activité à vie longue, contaminés par des émetteurs alpha (Projet PIVIC)

Le procédé PIVIC d'« Incinération et Vitrification In Can » a franchi un jalon « GO-NO GO » très important en 2016, permettant ainsi la poursuite des investissements sur le prototype à l'échelle 1 (partie haute du four d'incinération-vitrification).

Lancé depuis 2011 par AREVA, le CEA et l'Andra, le projet PIVIC vise à mettre au point un procédé, en une étape, permettant l'incinération et la vitrification des déchets technologiques issus de la fabrication des combustibles MOX.

Les déchets technologiques concernés sont dits « mixtes », car ils sont constitués d'un mélange de matières organiques (plastiques, papiers, chiffons...) et de pièces métalliques (câbles, outillage...). Ils sont aujourd'hui conditionnés dans des fûts et entreposés dans l'attente d'être traités. Il s'agit de déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL), uniquement contaminés par des émetteurs alpha (plutonium, uranium).

Dans ce procédé de traitement, les fûts sont introduits par le haut de l'installation et descendent progressivement dans une chambre de combustion (partie haute du procédé) où une torche à plasma brûle les déchets organiques et les réduit en cendres. En partie basse, l'ensemble est chauffé par induction, jusqu'à fusion du métal, conduisant elle-même à la fusion de la fritte de verre ajoutée pour l'incorporation des cendres. Le conteneur une fois élaboré contient une fraction métallique en fond surmontée d'une fraction vitrifiée.

Le jalon important de « GO-NO GO » de 2016 visait notamment à s'assurer de la capacité à maîtriser le risque de criticité, au sein de la chambre de combustion.

Le procédé PIVIC permet ainsi d'optimiser la sûreté en stockage en produisant un déchet peu réactif et capable de confiner la radioactivité. Il présente également l'avantage de réduire le volume des déchets initiaux, d'un facteur 7 (une dizaine de fûts pour un nouveau creuset).

Ce projet, co-financé par le Programme d'Investissements d'Avenir, est programmé jusqu'en 2024 (phase de R&D) pour une possible mise en service industrielle à l'horizon 2035.

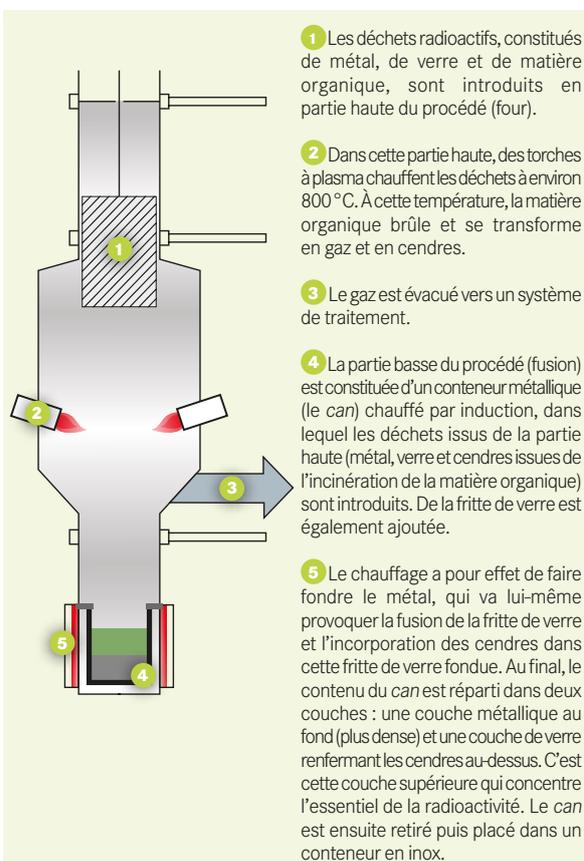


Stéphane Catherin

Ingénieur spécialiste en procédés de traitement des déchets, service Colis et Matériaux, direction de la Recherche et Développement

Le projet est né en 2011 de la volonté d'AREVA de trouver une solution de gestion innovante pour certains déchets radioactifs organiques destinés à Cigéo. L'Andra a proposé à AREVA de les accompagner dans le développement du nouveau procédé combinant l'incinération de déchets organiques et la vitrification des produits obtenus. C'est le projet PIVIC.

Depuis, une collaboration constructive pour un résultat « gagnant-gagnant » s'est mise en place entre les équipes d'AREVA, du CEA et de l'Andra. Notre participation au projet PIVIC permet de prendre en compte au plus tôt les exigences et les contraintes de Cigéo. La contribution technique de l'Andra a pris tout son sens en 2016, dans le cadre du passage du premier jalon majeur de « GO-NO GO » du projet PIVIC. L'Andra y a activement participé, notamment en évaluant le domaine de puissance thermique maximale des futurs colis PIVIC pour une prise en charge à Cigéo, en lien avec l'inventaire en radionucléides à l'origine du dégagement thermique, autrement dit avec la quantité de déchets incinérés par colis unitaire.



Procédé PIVIC

La valorisation de l'argilite excavée lors de l'exploitation de Cigéo, dans des matériaux géopolymères

L'année 2016 a vu la réalisation des premiers essais de calcination d'argilite démontrant ainsi la faisabilité de géopolymères, à partir d'argilite crue ou calcinée.

Des essais de calcination d'argilite ont été réalisés dans les conditions classiques d'activation du kaolin en métakaolin en four, mais également par une technique de calcination flash. Les premières caractérisations ont été réalisées sur l'argilite crue et sur le matériau calciné, avec un broyage similaire dans les deux cas. Les premiers résultats des différentes caractérisations mettent en évidence les modifications structurales induites par le traitement thermique à différentes températures. Le traitement thermique à 600 °C permet la conservation des carbonates et la déshydroxylation incomplète de la kaolinite initialement présente à l'état crue. Ceci n'induit pas de modifications significatives des propriétés physiques, chimiques et structurales de l'argilite. À partir de 750 °C, la kaolinite est complètement déshydroxylée et les carbonates se décomposent.

La faisabilité des géopolymères à base d'argilite a été étudiée en réalisant :

- dans un premier temps, des activations de poudres calcinées qui présentent une réactivité suffisante pour la formulation de géopolymères. Pour toutes les poudres calcinées à plus de 750°C, la faisabilité de géopolymères est confirmée ;
- dans un second temps, des essais substituant une partie des poudres réactives calcinées par de l'argilite crue. Ces essais ont permis de valider la faisabilité de géopolymères jusqu'à 50% de substitution. Pour un

Nathalie Texier-Mandoki
Ingénieur en science des matériaux,
service Colis et Matériaux , direction
de la Recherche et Développement



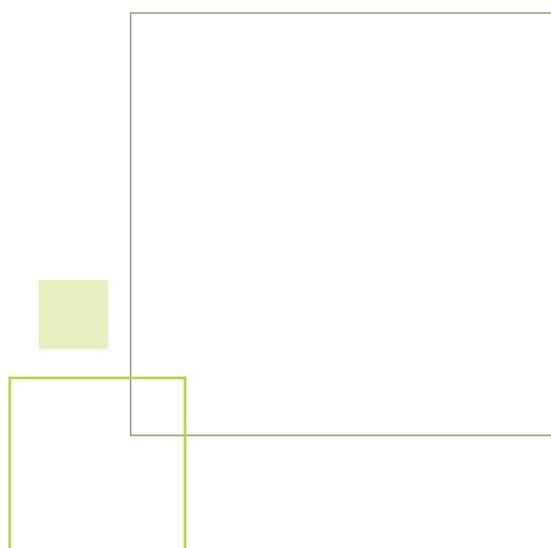
Les géopolymères sont de nouveaux liants minéraux possédant des propriétés d'usages, notamment en termes mécanique et thermique, qui pourraient répondre aux besoins de Cigéo. Ils sont synthétisés par activation d'une source aluminosilicate, par une solution alcaline. Classiquement, les métakaolins, minéraux naturels, sont utilisés comme source minérale pour leur pureté et leur réactivité. Mais, depuis quelques années, des études ont également montré qu'il était possible de synthétiser des géopolymères à partir d'une grande variété d'aluminosilicates moins purs, tels que les argiles brutes ou calcinées, ou les coproduits industriels (cendres volantes, laitiers de hauts-fourneaux). L'étude que nous avons lancée en 2015 avec le laboratoire SPCTS de l'Université de Limoges, vise à caractériser la réactivité des argilites du Callovo-Oxfordien brutes et à différents degrés de calcination, et à tester la faisabilité de liants géopolymères, à partir de ces matières premières, dans un objectif de valorisation sur site d'un coproduit d'exploitation.

pourcentage massique d'argilite crue supérieur à 50%, le mélange réactionnel est très liquide et la prise du géopolymère est trop longue ; les matériaux obtenus présentent une mauvaise consolidation.

Ces géopolymères feront l'objet d'optimisations et de caractérisations, notamment sur leur tenue au feu ; ils pourront, par exemple, être utilisés dans la conception de colis de stockage MA-VL, pour la protection thermique des colis de déchets primaires.

Échantillons		25A	600A	800A
				
Mouillabilité (µL/g)		453	507	702
S _{BET} (m ² /g)		38	30	6
Phase amorphe (%)		34	34	66
Aire des contributions (%)	Al ^{IV}	30	44	100

Propriété de l'argilite dans différentes conditions de calcination



2

L'ANDRA ET LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE

UNE COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE TOUJOURS FORTEMENT MOBILISÉE

Témoignage(s)
Philippe Cote
Marianne Ramaz

L'Andra renouvelle ses partenariats avec l'IFSTTAR et le LNE

En 2016, l'Andra a renouvelé, pour une durée de cinq ans, ses accords de partenariat de recherche avec l'IFSTTAR et le LNE, partenaires de l'Agence depuis plusieurs années.

L'expertise de l'IFSTTAR est mobilisée sur l'auscultation des ouvrages, la durabilité des bétons au sein du stockage, la géotechnique, le vieillissement des composants et des structures organiques (géomembrane) et l'analyse organisationnelle (FOH...).

Celle du LNE sur le suivi de l'environnement, les techniques de contrôle des colis de déchets, la sécurité incendie, le développement d'une instrumentation performante et durable pour les stockages, le traitement de la donnée et le *data mining*.

Philippe Cote

Directeur Adjoint Département GERS
(Géotechnique Environnement
et Sciences de la Terre) de l'IFSTTAR
et animateur IFSTTAR
de l'accord-cadre avec l'Andra



Nos collaborations avec l'Andra portent principalement sur des sujets en relation avec le stockage géologique de déchets radioactifs. Les équipes concernées des différents départements de l'IFSTTAR sont très enthousiastes à l'idée d'apporter quelques briques à un chantier d'une telle envergure.

Nous mobilisons des compétences de chercheurs et d'ingénieurs autour de thématiques comme la géophysique, les contrôles non destructifs ou le comportement des matériaux et des structures. En collaboration avec les équipes Andra, nous visons à des avancées méthodologiques pour suivre notamment les évolutions des zones endommagées au sein de la roche hôte ou celles de la teneur en eau et de la corrosion dans les bétons. Nous testons également le comportement de structures de soutènement en grandeur quasi réelle sur dalle d'essai.

Certaines de ces activités collaboratives sont entretenues depuis plusieurs années au sein d'accords cadres entre nos deux établissements et nous aspirons à voir ces relations perdurer et se renforcer en affichant par exemple la pérennité de certaines réflexions communes sur les capteurs, le monitoring ou d'autres sujets majeurs pour l'Andra et l'IFSTTAR.



Marianne RAMAZ
Chargée des Contrats et Partenariats
de Recherche au LNE

Notre collaboration avec l'Andra a démarré en 2009. En tant qu'expert de la Mesure, le LNE a été sollicité pour aider à la mise en place de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement sur le site de Bure. Il s'agissait notamment de répondre aux besoins futurs de surveillance des milieux aquatiques. Nos chimistes métrologues ont ainsi travaillé avec les équipes de l'Andra sur l'implémentation d'échantillonneurs et de dispositifs de mesure en continu au niveau des cours d'eaux des alentours du site. Au fil des années, notre partenariat s'est étendu avec des études nécessitant des expertises tournées vers la métrologie mécanique et énergétique. Ensemble, nous avons réalisé plusieurs projets visant à maîtriser les incertitudes et dérives des mesures liées à la surveillance des infrastructures. Nous avons par exemple travaillé sur la qualification des chaînes de mesure de température (capteurs - câbles - mesureurs), sur les performances des capteurs à corde vibrante ECV en étudiant les paramètres d'influence dans leur milieu d'emploi (béton et radiation), et également développé une méthode de détermination de la puissance thermique des colis avant stockage. Les années à venir seront l'occasion d'explorer d'autres sujets tournés vers la Sécurité incendie ou le Traitement des données.

Toutes ces exigences liées au stockage des déchets hautement radioactifs et moyennement radioactifs à vie longue permettent au LNE de déployer toute son expertise métrologique et son savoir-faire pluridisciplinaire afin de répondre à ces demandes très spécifiques et inédites. Cette collaboration est pour nous l'occasion de démontrer notre capacité à positionner notre Recherche et Développement au service de l'Industrie et à travailler au quotidien avec les plus grandes agences nationales sur des sujets sensibles.

Témoignage(s)
Karl Tombre

L'Andra partenaire de l'I-Site Lorraine

Le 29 septembre 2016, l'Andra a participé à la journée de lancement de l'I-Site Lorraine Université d'Excellence (LUE), à la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Lorraine (Vandœuvre-lès-Nancy). Partenaire de l'I-Site Lorraine, l'Andra met à disposition de l'Université, les outils de recherche que sont le Laboratoire Souterrain et l'Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) en Meuse/Haute-Marne,

ainsi que l'ensemble des données géologiques au sens large, acquises sur la zone de transposition¹ (ZT). L'Andra apporte également sa compétence en intégration des données scientifiques dans une logique de conception et d'évaluation de sûreté d'une installation.

L'objectif du projet LUE est de « *bâtir une université européenne positionnée en leader sur l'ingénierie systémique, avec une forte dimension de recherche technologique et une ambition de formation par la recherche* ». L'objectif du projet LUE est également de développer le leadership international du site lorrain, sur l'ingénierie, prise dans une acception systémique autour de six grands défis économiques et sociétaux :

- la maîtrise de l'ensemble de la chaîne de valeurs des matériaux, dans une optique d'économie circulaire, en mobilisant l'expertise des sciences des matériaux, notamment métalliques, l'analyse du cycle de vie, les secteurs d'emploi des matériaux et leurs contraintes spécifiques ;
- la gestion durable des ressources naturelles et de l'environnement, dans un contexte de changements globaux (climatiques, historiques, sociaux) et de contraintes économiques dans l'optique du développement d'une bio-économie verte ; les ressources à gérer comprennent le sous-sol, l'eau, les écosystèmes forestiers et agricoles, le bois, les sols et tous les services potentiellement rendus par l'environnement ;
- la mise en œuvre des énergies du futur et de la transition énergétique, par le développement de nouvelles sources ou vecteurs d'énergie à faible impact carbone et sur le changement climatique, l'environnement et la maximisation de l'efficacité énergétique des procédés industriels, des transports et des bâtiments ;
- la prise en compte pour la transition numérique des enjeux de passage à l'échelle, de maîtrise d'une complexité croissante, de fiabilité et de confiance, notamment pour l'exploitation et la maîtrise des big data et des systèmes de systèmes, et pour la sûreté et la confidentialité des systèmes de simulation et de contrôle des « usines du futur » ;
- le dialogue fertile entre l'ingénierie et les sciences de la vie et de la santé, pour améliorer la qualité de vie des personnes fragiles, handicapées ou vieillissantes ;
- l'ingénierie appliquée au champ de la connaissance et de la langue, richesse immatérielle de nos sociétés et de nos entreprises, mais facteur critique pour la cohérence des orientations et des choix futurs.

1. Zone de 250 km² dans laquelle les résultats acquis dans le Laboratoire Souterrain peuvent être transposés.

Les contributions de l'Andra s'inscrivent dans le cadre du deuxième défi sociétal de l'I-Site LUE : « La gestion durable des ressources naturelles et de l'environnement ».



Karl Tombre
Vice-président Stratégie européenne
et internationale, directeur exécutif
Lorraine Université d'Excellence

L'Université de Lorraine, avec ses partenaires de cœur CNRS, INRA, Inria, INSERM, CHRU, AgroParisTech et GeorgiaTech Lorraine, ses partenaires associés et ses nombreux soutiens du monde économique et des collectivités, a obtenu le label I-SITE (Initiatives-Science - Innovation - Territoires - Économie) pour son initiative Lorraine Université d'Excellence (LUE).

Notre ambition est d'établir une visibilité internationale de premier rang sur ces défis d'ingénierie systémique, en développant des projets phares sur des sujets spécifiques tels que les ressources renouvelables, la forêt et la chaîne du bois, les matériaux métalliques et magnétiques, les biomolécules pour la santé et d'autres applications, l'hydrogène comme vecteur énergétique, et l'ingénierie pour la médecine personnalisée.

Dans ce contexte général, le vaste défi de la gestion durable des ressources naturelles dans un contexte de changement global sera relevé grâce à une étroite coopération entre l'Université de Lorraine, l'Inra, le CNRS, AgroParisTech, le BRGM, l'Andra, l'IGN et l'Ineris. Ce défi mobilise plusieurs champs de compétences recouvrant les sciences de la terre et du sol, l'hydrologie, les sciences de la forêt et du bois, l'agronomie, les biotechnologies végétales et les sciences de l'aliment, et plus généralement la bio-économie. Ce domaine est actuellement abordé par des équipes de recherches reconnues et s'appuie sur un réseau d'infrastructures de recherche remarquable.

Le partenariat avec l'Andra sur ce défi est tout à fait naturel ; il découle à la fois du partenariat solide et historique de plusieurs de nos laboratoires avec l'Andra, notamment dans le contexte du laboratoire de Bure mais aussi dans celui de l'Écothèque, de la volonté partagée de s'inscrire dans une vision systémique des grands enjeux du XXI^e siècle, et du caractère unique et exceptionnel de l'infrastructure de recherche que représente le laboratoire de Bure. Le dialogue entre nos institutions a toujours été d'une grande qualité, ouvert et constructif, et nous comptons beaucoup sur l'apport de l'Andra dans les projets structurants qui seront progressivement mis en place dans le contexte de l'initiative LUE.

UNE MONTÉE EN PUISSANCE DE L'INVESTISSEMENT DE L'ANDRA DANS LES PROJETS EUROPÉENS

■ Le workshop Modern2020 sur le développement des technologies pour l'observation/surveillance des stockages

Témoignage(s)
Johan Bertrand

Un workshop du projet européen de R&D Modern2020 dédié à la R&D sur l'observation et la surveillance (monitoring) des stockages profonds de déchets radioactifs, a été organisé par l'Andra les 29 et 30 novembre 2016 à Châtenay-Malabry. Ce workshop a réuni l'ensemble des organisations impliquées dans le projet (agences et laboratoires de recherche) et a permis de faire un premier point sur les avancées réalisées, depuis le lancement du projet en 2015.

Johan Bertrand
Ingénieur en instrumentation,
service Monitoring et Traitement
des Données, direction de la
Recherche et Développement



Depuis plusieurs années, l'Andra participe activement à des programmes européens de recherche sur la surveillance des stockages géologiques profonds pendant la période d'exploitation. À la suite d'un premier projet en 2013-2015, appelé Modern, portant notamment sur les principes et la stratégie de surveillance, un second projet, appelé Modern2020 a été lancé en juin 2015 ; coordonné par l'Andra, il réunit vingt-huit partenaires. Il a pour objectif de développer de façon conjointe des dispositifs opérationnels pour la surveillance, tout en prenant en compte des exigences propres à chaque contexte national. Les premiers travaux portent sur la mise en place d'une méthodologie d'identification et de hiérarchisation des paramètres à surveiller. À cette liste de paramètres doivent correspondre des dispositifs de surveillance. Ainsi, la qualification de technologies existantes et/ou innovantes, pour un stockage géologique profond, notamment au travers de démonstrateurs dédiés, fait partie du projet. Par ailleurs, des représentants des populations locales de certains pays ont été associés au projet, afin de permettre une information et un dialogue sur la surveillance des stockages profonds en tant qu'outil de maîtrise de leur fonctionnement, et sur l'instrumentation associée.

Les travaux du workshop se sont concentrés sur plusieurs objectifs du projet :

- améliorer les technologies de la transmission sans fil ;
- développer des sources d'énergie permettant l'autonomie des dispositifs de mesure ;
- développer de nouveaux capteurs fibre optique, notamment pour mesurer la teneur en eau et la chimie de l'eau ;
- améliorer et perfectionner les méthodes de caractérisation de la zone endommagée de la roche en champ proche des ouvrages souterrains (son étendue, la densité de fracturation et son éventuelle évolution...);
- établir une méthodologie commune pour qualifier les systèmes de mesure.



Novembre 2016, Workshop du projet européen de R&D Modern2020 dédié à la R&D sur l'observation et la surveillance des stockages profonds de déchets radioactifs



Le Mid-Term workshop du projet JOPRAD sur le stockage géologique

Accepté en 2015 dans le cadre du programme Euratom-Horizon 2020, et piloté par l'Andra, ce projet européen porte sur la définition d'un programme de recherche collaborative au niveau européen dans le domaine de la R&D sur le stockage géologique. Il répond à la volonté de la Commission Européenne de rassembler l'ensemble des acteurs, organismes en charge de la gestion des déchets radioactifs, supports techniques aux autorités de sûreté et organismes de recherche, au sein d'une même structure de recherche, avec une vision commune. L'objectif du projet JOPRAD est d'identifier les conditions de la faisabilité d'un tel programme collaboratif, ainsi que les sujets sur lesquels il serait pertinent de mutualiser la recherche à l'échelle européenne.

Témoignage(s)
Marie Garcia
Jacques Delay
Stéphan
Schumacher

Marie Garcia
Ingénieur gestion de projets
scientifiques, direction de
la Recherche et Développement



Aujourd'hui, la Communauté européenne souhaite opérer un tournant dans le mode de coopération et de gouvernance de la recherche européenne sur la gestion des déchets radioactifs, et plus particulièrement le stockage géologique, en soutenant non plus des projets individuels mais des programmations conjointes de recherche (*Joint Programme*) rassemblant l'ensemble des parties prenantes autour d'une vision à moyen/long-terme et d'un agenda stratégique de recherche. Concrètement, cela signifie qu'il n'y aura plus d'appels à projets de la Commission européenne ; la gestion des programmes de recherche relèvera directement des parties prenantes du *Joint Programme*.

Un tel *Joint Programme* sur la gestion et le stockage des déchets radioactifs rassemblerait au niveau européen les agences de gestion des déchets radioactifs (*Waste Management Organisations - WMOs*), les organisations exerçant la fonction expertise auprès des régulateurs (*Technical Support Organisations - TSOs*), les centres de recherche (*Research Entities - REs*), les producteurs de déchets et la société civile. Ce *Joint Programme* s'adresse à l'ensemble des États-membres, nucléarisés et non nucléarisés quel que soit le stade d'avancement de leur programme national de gestion des déchets radioactifs.

L'année 2016 a été une étape clé du projet avec la tenue du *Mid-Term* workshop, organisé à Prague les 7 et 8 septembre 2016.

Rassemblant environ quatre-vingt participants venant de dix-neuf pays (Europe et au-delà), il s'agissait de faire un point général avec pour objectif de définir les contours d'une éventuelle programmation conjointe de la recherche sur la gestion des déchets radioactifs au niveau européen. La méthodologie développée pour identifier le périmètre du programme de recherche a été présentée. Les premières réflexions autour de la gouvernance d'un futur EJP (*European Joint Programme* piloté par l'Andra) ont également été présentées et discutées lors du workshop.

Ce *Mid-Term* workshop a marqué la volonté de tous les acteurs de poursuivre le travail collectif en vue d'établir un programme de recherche collaborative.



Jacques Delay
Ingénieur coordinateur du projet JOPRAD, direction de la Recherche et Développement

Lancé en juin 2015 et piloté par l'Andra, le projet européen JOPRAD vise à étudier la faisabilité et la valeur ajoutée d'une telle programmation de recherche conjointe autour de la gestion et du stockage des déchets radioactifs. Une première activité a consisté à identifier l'ensemble des parties prenantes en Europe afin de les inviter à prendre part au projet JOPRAD, puis de recueillir leurs besoins de R&D qui pourraient être inclus dans une programmation conjointe.

Le projet vise également à proposer un schéma de gouvernance, et des principes de fonctionnement, ainsi qu'à identifier les grands jalons à atteindre, afin d'être en mesure de soumettre une proposition de *Joint Programme* à la Commission européenne, d'ici fin 2018.

Le *Mid-Term* workshop qui s'est tenu en septembre 2016 a permis de présenter, à l'ensemble de la communauté, les travaux menés au sein de JOPRAD. Il en ressort une réelle reconnaissance par les participants de la faisabilité ainsi que de la valeur ajoutée d'une programmation de recherche conjointe, sous réserve de répondre aux besoins spécifiques des différents États-Membres.

Stéphan Schumacher

Chef du service Colis et Matériaux,
direction de la Recherche et

Développement, responsable Andra du développement du *Document Programme* d'un futur EJP sur la R&D pour le stockage géologique profond



Un travail important du projet JOPRAD consiste à développer, d'ici la fin du projet (novembre 2017), un *Document Programme* pour les dix à quinze prochaines années, sur lequel sera fondé le futur *Joint Programme*. En 2016, nous avons finalisé une première version de ce *Document Programme*.

Consulter l'ensemble des acteurs (WMOs, TSOs et REs) à l'échelle européenne, pour définir et mettre en priorité des thématiques de R&D d'intérêt commun, s'est révélé un véritable challenge. Le périmètre scientifique et technique du *Document Programme* comprend le pré-stockage des déchets (traitement/caractérisation/conditionnement, hors démantèlement), l'entreposage et le stockage géologique.

Ces thématiques de R&D seront complétées par des activités dites « transverses » qui regroupent notamment des échanges autour de problématiques communes (exemples : déchets historiques, traitement des incertitudes...) ou encore des activités de *Knowledge Management*, telles que le transfert de connaissances entre organisations, la formation et la capitalisation des connaissances.

Le Projet européen FINESSE (Fibre Nerveous Sensing SysEms)

Témoignage(s)
Sylvie Lesoille

Les fibres optiques sont une technologie de capteur, retenue par l'Andra pour la surveillance de Cigéo. L'Agence y consacre un effort de recherche et d'innovation, important.

En 2016, l'Andra est devenue partenaire du consortium européen FINESSE (Fibre Nerveous Sensing SysEms), financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre du programme AMSC (Actions Marie Skłodowska-Curie) consacré aux ressources humaines et à la mise en valeur des carrières des chercheurs du public et du privé.

FINESSE est un réseau européen de formations innovantes visant à former une nouvelle génération de jeunes chercheurs. Il rassemble vingt-six partenaires et permet de financer quinze thèses à travers l'Europe et Israël, sur les capteurs à fibre optique, avec pour ambition l'élargissement des applications de cette technologie, pour une société plus sûre.

L'Andra accueillera de 2017 à 2020 une doctorante, dont les travaux porteront sur l'instrumentation de tunnels en béton, et plus particulièrement sur le traitement des mesures réparties de déformations, acquises par des fibres optiques placées sur des circonférences de galeries du Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne, pour déduire la convergence de ces ouvrages.



Sylvie Lesoille
ingénieur spécialiste des fibres optiques, service Monitoring et Traitement des données, direction de la Recherche et Développement

La doctorante sera accueillie et formée pendant dix mois, chez les partenaires du projet ITN-FINESSE, en particulier à l'université de Cambridge (Royaume-Uni) qui implémente des capteurs à fibres optiques dans de très nombreux chantiers de génie civil et souterrain, chez le câblé Brugg (Suisse), fournisseur de câble à fibre optique, et à l'université de Nantes, école doctorale de rattachement.

Grâce à ces échanges, la doctorante va développer un câble de mesure de déformations dédié aux revêtements et soutènements en béton. La robustesse aux grandes déformations (sans réduire la sensibilité) et la compatibilité avec l'environnement du stockage (radiations, hydrogène et température) sont les grands enjeux de ces développements de capteurs fibre optique.

Par ailleurs, l'Andra est membre du *supervisory board*, en charge de la communication du projet, et participe, à ce titre, aux diverses actions de formation des jeunes doctorants, notamment aux cinq semaines de *training events* qui ponctuent les quatre années du projet.

UNE ANNÉE RICHE EN MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES

En 2016, l'Andra a participé à trente-quatre manifestations dont vingt-quatre à l'international

Témoignage(s)
Nicole Godon

L'Andra organise une journée d'information et d'échange sur Cigéo à l'attention de ses partenaires de R&D

Organisée le 15 septembre 2016 à l'espace Vasarely d'Antony, cette journée avait pour objectif de permettre aux spécialistes des domaines scientifiques et

technologiques mobilisés par les problématiques liées à Cigéo, de mieux appréhender le développement du projet, ses spécificités en termes de sûreté, les grands acquis de la R&D depuis le dossier 2005 et leur utilisation pour la conception et la sûreté de Cigéo, ainsi que les grandes questions de R&D des années à venir. Cette journée a réuni cent cinq partenaires de R&D de l'Agence.



Nicole Godon
Chercheur au CEA-DEN-DE2D-SEVT
Laboratoire d'études du Comportement à Long Terme des matériaux de Conditionnement

Au sein du CEA, j'étudie pour l'Andra, AREVA et EDF, le comportement à long terme des colis de déchets de haute activité (HA) vitrifiés, en conditions de stockage géologique et notamment leur altération aqueuse. Ces études vont de « simples » essais paramétriques où l'on analyse l'effet d'un paramètre (pH, température, irradiation, présence de matériau d'environnement...) jusqu'à des études dites « intégrales », où l'on cherche à simuler l'altération du verre, dans les conditions le plus représentative possibles (géométrie du stockage, nature des matériaux, rapports de masses et de surfaces...).

Le but de ces études est la compréhension exhaustive des mécanismes mis en jeu, et de leur sensibilité aux conditions environnementales, pour aboutir à une modélisation robuste, majorante mais réaliste, et suffisamment simplifiée de l'altération à long terme du colis en conditions de stockage. À ce titre, participer à une réunion telle que celle qui a été organisée en septembre 2016 est tout à fait enrichissant. Cela m'a permis de mesurer les acquis scientifiques et techniques touchant à l'ensemble du projet Cigéo, sur des domaines qui sont donc plus vastes que mes domaines d'expertise. J'ai pu me rendre compte de la façon dont l'Andra utilisait le socle de connaissances scientifiques et techniques pour établir et faire évoluer ses concepts de stockage. Enfin, j'ai pu évaluer ce qu'attendait encore l'Andra de la R&D à court et moyen terme sur l'ensemble de la problématique du stockage, ce qui est extrêmement important et motivant pour la suite de nos recherches.



L'Andra organise une journée scientifique de l'Observatoire Pérenne de l'environnement (OPE)

Le 5 Octobre 2016, les principaux partenaires scientifiques de l'Andra dans le domaine des sciences de l'environnement se sont réunis dans les salons de la gare de l'Est à Paris, à l'occasion d'une journée scientifique qui avait pour objectif de présenter les dispositifs mis en œuvre dans le cadre de l'OPE et les principaux résultats, en vue de favoriser l'émergence de projets d'intégration des données. Une soixantaine de personnes a participé à cette journée. Cette initiative fait écho aux développements de structures de recherches intégrées lancées depuis plusieurs années au sein de la communauté scientifique française et internationale, dans le domaine des sciences de l'environnement.



Yvan Lagadeuc
Professeur d'écologie à l'Université de Rennes I, président du COS-OPE (Comité d'orientation et de suivi de l'OPE)

L'objectif majeur de l'OPE est d'identifier les effets, sur l'environnement, de la mise en œuvre du chantier et ensuite de l'exploitation industrielle de Cigéo, sur le site de Bure. À ce titre, l'OPE représente pour les communautés scientifiques un lieu privilégié pour étudier et comprendre les mutations d'un territoire. Un tel événement sur un territoire n'est pas unique, mais pouvoir disposer d'une telle infrastructure de recherche et d'observation, l'est. Le nombre des participants et la diversité des compétences présentes lors de la journée scientifique du 5 octobre 2016, témoignent parfaitement des enjeux et de la mobilisation de cette communauté scientifique. L'insertion et la labellisation de l'OPE dans les réseaux nationaux et internationaux sont également un point fort de l'observatoire, comme l'a souligné l'ensemble des membres du COS-OPE, car elles témoignent de la pertinence du dispositif et assurent ainsi la mise en perspective des observations qui seront réalisées.



L'Andra organise les Journées FMR (Fibres optiques en Milieu Radiatif)



Les septièmes journées techniques sur les fibres optiques en milieu radiatif ont été organisées les 11 et 12 décembre 2016, au Siège de l'Andra à Chatenay-Malabry.

Parrainées par la SFO (Société Française d'Optique), ces journées ont porté sur la tenue en environnement radiatif des fibres optiques passives ou actives, des composants fibrés (réseaux, lasers...) et des capteurs à fibres optiques. Les environnements concernés sont les environnements civils et militaires, médicaux, spatiaux, les stockages de déchets radioactifs, les grandes infrastructures scientifiques (Laser Mégajoule, ITER, CERN ...).

Cet événement a réuni trente-neuf participants. Les industriels étaient bien représentés, avec des fournisseurs de fibres optiques comme IXBlue et Draka ou de composants fibrés (HBM, Opsens...), et des utilisateurs de ces systèmes (EDF, AREVA...). Parmi les participants se trouvaient également des chercheurs d'organismes publics et privés, des doctorants et des experts.

Les quatre sessions techniques ont permis d'échanger sur des sujets variés, comme la modélisation en physique quantique, la caractérisation spectroscopique des mécanismes de génération de défauts par les rayonnements dans la silice, ou encore le développement de systèmes d'instrumentation et de capteurs à fibre optique, compatibles avec des environnements ionisants.

Pour l'Andra, les échanges ont permis de conforter la faisabilité et la fiabilité des systèmes optiques de transmission (une partie du contrôle-commande) et de surveillance (caméras, capteurs) envisagés pour Cigéo.

■ **L'Andra organise le colloque *Proving Futures and Governing Uncertainties in Technosciences and Megaprojects***

Le colloque *Proving Futures and Governing Uncertainties in Technosciences and Megaprojects* a eu lieu à la Maison de la Chimie de Paris, du 12 au 14 décembre 2016.



Structuré autour de vingt-cinq présentations réparties en quatre séances, deux tables rondes, une *Keynote* et la projection du film *Containment*, le colloque a réuni environ soixante-dix participants d'une trentaine d'organismes de différents pays. L'approche scientifique et technique de l'Andra en matière de traitement des incertitudes du futur pour la décision publique, est le fruit d'une expérience assez rare. Cette expérience intéresse aussi d'autres programmes complexes et pourrait nourrir et fédérer ces intérêts, en dehors de modalités institutionnelles, notamment auprès de la communauté des opérateurs de la gestion des déchets radioactifs.



3

LA GOUVERNANCE SCIENTIFIQUE DE L'ANDRA

UN CONSEIL SCIENTIFIQUE MOBILISÉ SUR DES THÉMATIQUES À ENJEUX FORTS POUR LES PROJETS CIGÉO ET FA-VL

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 douze 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.

Dans le cadre de sa démarche d'excellence scientifique, l'Andra s'appuie également, sur le plan opérationnel, sur des comités scientifiques spécialisés.

En 2016, le Conseil scientifique s'est prononcé sur des thématiques à forts enjeux pour la conception et l'évaluation de sûreté du stockage Cigéo, comme le comportement thermo-hydro-mécanique du Callovo-Oxfordien ou encore le comportement et la migration des gaz dans les différents composants de Cigéo. Le Conseil Scientifique s'est également prononcé sur les orientations des actions relatives à la santé envisagées par l'Andra autour de Cigéo et sur la méthodologie d'évaluation géoprospective (évolution du climat et du paysage) pour Cigéo comme pour FA-VL.

Isabelle Herlin

Directrice du centre Inria Lille –
Nord Europe, membre du Conseil
Scientifique de l'Andra



Madame Isabelle Herlin a rejoint le Conseil Scientifique de l'Andra en mars 2016. Directrice du centre de recherche Inria Lille-Nord Europe, Isabelle Herlin est une spécialiste reconnue du traitement d'image au moyen de méthodes d'assimilation de données dans les modèles de prévision environnementale.

C'est avec beaucoup de fierté que j'ai accepté ce mandat de membre du Conseil scientifique de l'Andra. De grands défis attendent l'Agence sur les prochaines années, qui se trouve dans une période charnière de son activité.

Autour du projet Cigéo tout d'abord, la demande d'autorisation de création (DAC) est en phase finale de rédaction, et le Conseil Scientifique devra émettre des avis sur plusieurs dossiers scientifiques présentés par les services de la direction de la Recherche et Développement. La question de l'observation et de la surveillance de Cigéo est en particulier une composante importante de la R&D, que ce soit pour la DAC ou, au-delà, dans le cadre du développement incrémental défini pour Cigéo.

Enfin, le Conseil Scientifique accompagnera l'Agence et émettra des avis sur d'autres projets structurants d'importance, tel que le projet PIVIC et la gestion optimale des déchets par incinération puis vitrification.

DES AUDITIONS DE L'ANDRA DANS LE DOMAINE DE LA R&D PAR UNE CNE2¹ RENOUVELÉE

En 2016, l'Andra a été auditionnée en particulier sur les comportements thermo-hydro-mécanique et hydraulique-gaz de Cigéo et du milieu géologique environnant.

Créée par la Loi de juin 2006 pour apprécier l'état d'avancement des recherches concernant la gestion des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue, la Commission nationale d'évaluation (CNE2, www.cne2.fr) évalue annuellement l'état d'avancement des recherches et des études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs.

Un rapport est publié annuellement et transmis au gouvernement et au parlement qui le soumet à l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST).

Le 20 septembre 2016, quatre nouveaux membres ont été désignés par le Directeur général de l'énergie et du Climat pour rejoindre la Commission nationale d'évaluation (CNE) :

La nouvelle Commission est ainsi dorénavant constituée des membres suivants (les nouveaux membres sont signalés par un astérisque*) :

Jean-Claude DUPLESSY

Président de la Commission nationale d'évaluation. Directeur de recherche émérite au CNRS. Membre de l'Académie des Sciences.

Anna CRETI*

Professeur d'économie à l'université Paris Dauphine.

Frank DECONINCK

Président Honoraire du Centre d'études de l'énergie nucléaire de Mol, Belgique. Professeur émérite de la Vrije Universiteit Brussel.

Pierre DEMEULENAERE

Professeur de sociologie à l'Université de Paris-Sorbonne (Paris IV).

Robert GUILLAUMONT

Membre de l'Académie des Sciences (section chimie). Membre de l'Académie des technologies (membre fondateur).

Vincent LAGNEAU*

Directeur-adjoint de l'Ecole des Mines Paris Tech.

Maurice LAURENT

Secrétaire Général de la Commission nationale d'évaluation. Directeur honoraire de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

Emmanuel LEDOUX

Vice-président de la Commission nationale d'évaluation. Directeur de recherche à l'Ecole des mines de Paris.

Mickaele LE RAVALEC*

Chef du département Géorressources à l'IFPEN.

Maurice LEROY

Vice-président de la Commission nationale d'évaluation. Membre associé de l'Académie Nationale de Pharmacie. Professeur émérite à l'Université de Strasbourg.

José Luis MARTINEZ*

Directeur Général du Consortium ESS-Bilbao (Bilbao, Espagne).

Gilles PIJAUDIER-CABOT

Professeur de Génie Civil, ISA-BTP, LFC-R.

Claes THEGERSTRÖM

Président Directeur Général de SKB (Compagnie suédoise chargée de la gestion des combustibles et des déchets nucléaires). Membre de l'Académie Royale suédoise des sciences de l'ingénieur.

1. Commission nationale d'évaluation 2

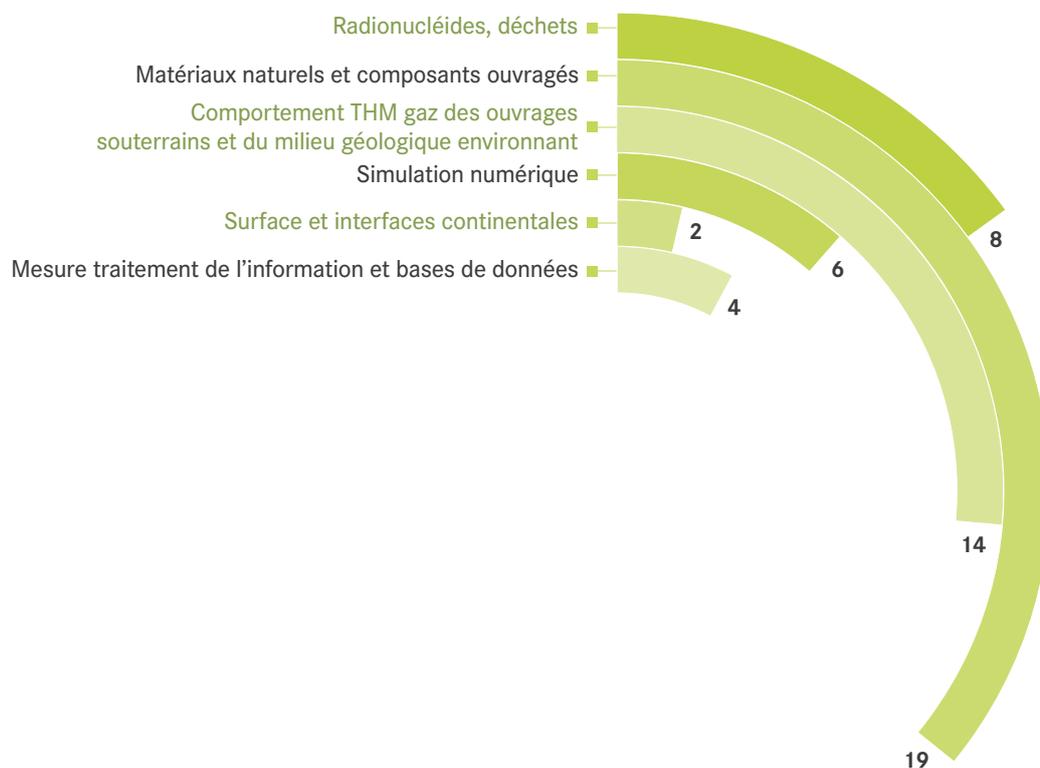
ANNEXES

LES PUBLICATIONS

Depuis plusieurs années, l'Andra partage les connaissances qu'elle contribue à créer en publiant les résultats des travaux qu'elle mène avec la communauté scientifique, dans des revues scientifiques de rang A¹.

En 2016, l'Agence a ainsi contribué à la publication de cinquante-trois articles avec un *impact factor* moyen de 2,85.

Publications dans des revues de rang A par thématique scientifique en 2016



1. Revues internationales reconnues, à comité de lecture

LES BREVETS À CARACTÈRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE, DÉPOSÉS 2016

Référence	Date de dépôt	Intitulé
FR 16 54329	13/05/2016	Procédé de mesure de localisation d'un événement de scintillation à partir d'équipement d'acquisition pixélisé dans un imageur temporel
FR 16 55358	10/06/2016	Procédé de recyclage d'un conteneur usagé
FR 16 56172	30/06/2016	Tronçon cylindrique tri-composant et préfabriqué de chemisage d'une alvéole de stockage souterrain de déchets radioactifs
FR 16 56173	30/06/2016	Procédé de formation et d'installation <i>in situ</i> d'un double tubage d'une alvéole de stockage souterrain de déchets radioactifs
FR 16 56719	13/07/2016	Installation de transport par câble
FR 16 59397	30/09/2016	Dispositif et système de détection de rayonnements ionisants et de neutrons (refroidissement)
FR 16 63226	22/12/2016	Plateforme de stockage de déchets faiblement radioactifs comportant une alvéole optimisée

LES THÈSES COMMENCÉES EN 2016 ET LES POST-DOCTORANTS

Sept doctorants Andra ont commencé leur thèse en octobre 2016

Doctorant(e)	Sujet	Laboratoire d'accueil
Élodie CHAPOULADE	Optimisation de l'instrumentation pour le suivi et l'évaluation de l'état des alvéoles de stockage	Institut Pascal Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand
Benjamin DARDE	Effet des hétérogénéités locales de densité des noyaux d'ouvrages de fermeture à base de pellets d'argile gonflante, sur leur saturation	Laboratoire Navier ENPC
Colin DUPUY	Formulations et contrôle de la prise de liants argilites géopolymères de valeur pH légèrement basique : rôle de la lixiviation de l'argilite en fonction du traitement préalable	Laboratoire Sciences des Procédés Céramiques et de Traitement de Surface Université de Limoges

Romarc KOSTENKO	Étude de la méthode de Boltzmann sur réseau pour la simulation macroscopique des écoulements et du transfert de masse en milieu poreux	Laboratoire FAST Université Paris Sud
Sébastien LE CROM	Compréhension et modélisation du comportement des fluides et des solutés en milieux insaturés à l'échelle microscopique	Laboratoire Phenix Université Pierre et Marie Curie
Jérémy SERVEAUX	Rupture ductile d'un surconteneur de déchets HA soudé par faisceau d'électrons soumis à une corrosion généralisée	Laboratoire ICD/LASMIS Université Technologique de Troyes
Héloïse VERRON	Comportement des matériaux de remplissage ciment-bentonitiques dans les alvéoles HA de stockage de déchets radioactifs : étude physico-chimique des interactions avec fer métal en cours de corrosion et argilite naturelle oxydée entre 25 °C et 90 °C	Laboratoire Géoressources Université de Lorraine

Trois post-doctorants Andra ont poursuivi leurs travaux en 2016

Post-doctorant(e)	Sujet	Laboratoire d'accueil
Djiby BA	Étude du comportement en milieu géologique de revêtements anticorrosion Al, Zn et Zn15Al pour surconteneur de déchets HA	LaSIE, Université de La Rochelle
Sarah CHAKRI	Comparaison des techniques électrochimiques pour la mesure de corrosion dans les ciments bentonitiques	Laboratoire LISE Université Pierre et Marie Curie
Benjamin PAUGET	Modélisation de l'influence de facteurs environnementaux sur la réponse de bio-indicateurs exposés à des contaminants persistants dans l'environnement	Laboratoire Chrono-environnement Université de Besançon



LA JEUNE CHERCHEUSE ISABELLE PLANES REÇOIT LE PRIX DE LA MEILLEURE PRÉSENTATION ORALE

La doctorante Isabelle Planes, doctorante Andra-promotion 2014, a été récompensée du prix de la meilleure présentation orale lors de la conférence internationale *Asia-Pacific Optical Sensors (APOS)*, qui s'est tenue en Chine en octobre 2016. Sa thèse, financée par l'Andra et préparée au laboratoire Hubert-Curien de l'université Jean-Monnet de Saint-Étienne et du CNRS, porte sur les fibres optiques qui pourraient être utilisées pour l'observation/

surveillance du futur centre industriel de stockage géologique Cigéo. *« L'objectif de ma thèse est d'étudier des capteurs pour mesurer la température, la déformation, les radiations et l'hydrogène. Ce que j'apprécie particulièrement dans ce sujet, c'est de pouvoir faire de la recherche avec une vocation applicative dans l'industrie »,* précise la jeune lauréate.

LES THÈSES SOUTENUES EN 2016

TRANSFERTS DANS LA BIOSPHÈRE

Cycle biogéochimique du bore dans l'écosystème forestier du site de Montiers

BEF-INRA Nancy / Université de Strasbourg

Philippe Roux a soutenu sa thèse (cofinancée par l'Andra), le 7 avril 2016, sur le « Cycle biogéochimique du bore dans un écosystème forestier : étude de la hêtraie du site de Montiers » à l'Université de Strasbourg. L'objectif de cette thèse était de consolider la compréhension du cycle biogéochimique du bore et de ses isotopes au sein d'un écosystème forestier. Les travaux ont notamment porté sur le développement de techniques d'analyse innovantes permettant l'extraction, la purification et la mesure du bore et de ses isotopes au sein des matrices végétales. Les résultats montrent par ailleurs que l'évolution des compositions isotopiques dans les différents compartiments est essentiellement due à trois paramètres : le flux d'altération qui assure le renouvellement du stock de bore au sein du sol, le taux de prélèvement qui traduit l'intensité du cycle biologique et le taux de formation du bois qui est le mécanisme qui fractionne le plus les isotopes au sein du cycle biologique.

BASE DE DONNÉES THERMOCHIMIE

Constitution d'un jeu de données thermodynamiques

EPI/MIS BRGM

Cédric Roos, doctorant Andra, a soutenu sa thèse le 7 avril 2016 à l'université de Poitiers, sur la constitution d'un jeu de données thermodynamiques pour les phases C-S-H, C-A-S-H et M-S-H, dans le cadre de la base de données Thermochimie. Ses travaux ont porté sur la caractérisation de la quantité d'eau structurale au sein des C-S-H.

Des données fondamentales telles une masse molaire fiable des C-S-H pour différents rapports C/S ont été obtenues.

DEVENIR DU CHLORE ORGANIQUE DANS L'ENVIRONNEMENT

Développement de méthodes analytiques et expérimentales

LIEC (Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux)

Aurélien Osswald a soutenu sa thèse (cofinancée par l'Andra et l'Université de Lorraine), le 6 juillet 2016. Ses travaux de thèse portent sur l'« Étude du

chlore organique dans les sols et de sa formation en conditions biotiques et abiotiques ». L'un des acquis importants de ses travaux est l'utilisation d'un marquage en chlore 37 pour identifier la contribution des processus biotiques et abiotiques à la formation de chlore organique dans l'environnement.

VÉGÉTALISATION DES VERSES

Influence des molécules antioxydantes produites par des plantes sur l'évolution physico-chimique et microbiologique de l'argilite du Callovo-Oxfordien

LIMOS (Laboratoire des Interactions Microorganismes - Minéraux - Matière organique dans les sols)

Dimitri Ubersfeld a soutenu sa thèse sur « l'influence des molécules antioxydantes produites par des plantes sur l'évolution physico-chimique et microbiologique de l'argilite du Callovo-Oxfordien » le 13 octobre 2016, à la Faculté des Sciences et Techniques de Nancy. Ce travail réalisé dans le cadre du partenariat avec l'Université de Lorraine, porte sur l'impact de molécules antioxydantes et de la végétalisation des verses par des plantes produisant ces molécules, sur les processus d'altération physiques, chimiques ou microbiens de l'argilite du Callovo-Oxfordien. Les plantes étudiées sont la lavande et le lavandin.

Ces travaux ont montré que même si les molécules antioxydantes n'inhibent pas significativement l'altération de l'argilite, le lavandin s'est révélé une plante tout à fait pertinente pour la phytostabilisation des verses et la production de molécules antioxydantes *in situ*.

CORROSION ANOXIQUE DES CONSTITUANTS MÉTALLIQUES DES ALVÉOLES HA

Étude de l'origine, biotique ou abiotique, des sulfures de fer

Unité Mixte de Recherche CEA-CNRS (UMR 3685) NIMBE (Nanosciences et Innovation pour les Matériaux, la Biomédecine et l'Énergie) / LAPA (Laboratoire « Archéomatériaux et Prévision de l'Altération »)

Sophie Grousset a soutenu sa thèse sur la « détermination de la composition isotopique du soufre pour l'étude de l'origine, biotique ou abiotique, des sulfures de fer en corrosion anoxique », le 24 novembre 2016. Ce travail, cofinancé par l'IRSN et l'Andra a porté sur le développement d'une méthode de détermination de l'origine, biotique ou abiotique, des sulfures de fer *in situ*, au sein même des couches de produits de

corrosion des matériaux métalliques. Les résultats des analyses isotopiques des sulfures et/ou des sulfates permettent de conclure sur l'intervention possible des bactéries au cours du processus de corrosion.

Les résultats de la mise en œuvre de la technique sur un échantillon provenant de l'expérimentation en Laboratoire Souterrain MCO (Corrosion des matériaux ferreux) montrent que les sulfures de fer ont une origine biotique.

TRANSFERT DE L'ARSENIC ET DU CHROME EN MILIEU ARGILEUX

Influence des conditions physico-chimiques et de la présence de ligands

École des Mines de DOUAI - Département Génie Civil et Environnemental

Coralie Deparis a soutenu sa thèse le 8 décembre 2016 à l'École des Mines de Douai, sur l'effet de la présence de ligands (carbonates, phosphates...) sur le comportement de l'arsenic et du chrome en milieu argileux. Ce travail, réalisé dans le cadre du partenariat avec Armines, porte sur la compréhension du transfert de l'arsenic et du chrome, et sur l'évaluation de leur mobilité dans les systèmes argileux incluant les argiles tégulines, pour différents contextes géochimiques. Les résultats expérimentaux montrent notamment une rétention importante de l'arsenic (V) *via* des mécanismes de sorption spécifiques sur les argiles et les oxydes de fer ainsi qu'une forte sensibilité à la présence de phosphates dans le milieu argileux. La sorption du chrome (VI) sur le substrat constitué des argiles tégulines est faible.

CONVERGENCE À LONG-TERME DES GALERIES EXCAVÉES DANS LES ARGILITES DU CALLOVO-OXFORDIEN

Rôles de l'anisotropie et des couplages hydromécaniques

Laboratoire Navier/CERMES - Équipe Géotechnique

Lina María Guayacan Carrillo a soutenu sa thèse sur l'« Analyse de la convergence à long-terme des galeries excavées dans les argilites du Callovo-Oxfordien : rôles de l'anisotropie et des couplages hydromécaniques », le 9 décembre 2016. Les travaux effectués dans le cadre de la thèse ont porté principalement sur une étude directe des mesures de convergence *in situ*, afin d'analyser, à l'aide d'une loi semi-empirique, la réponse anisotrope du massif pendant l'excavation et après celle-ci. Différentes galeries excavées dans le Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne ont été étudiées. Ces galeries présentent certaines différences dans leurs orientations et l'état initial des contraintes, dans la méthode et la vitesse d'excavation ainsi que

dans les diamètres de la section et les types de soutènements installés. Cette analyse a permis d'obtenir des prédictions fiables de la convergence à long-terme, utilisables pour le dimensionnement et la prévision de la performance du soutènement à long-terme. La réponse anisotrope du champ de pression interstitielle observée *in situ* a été également étudiée, par une approche poroélastique anisotrope, l'objectif principal étant de reproduire qualitativement l'évolution de la pression des pores autour des galeries. Enfin, une analyse de l'apparition de la rupture a montré le rôle clé que joue le couplage hydromécanique dans l'extension de la zone fracturée.

COMPORTEMENT D'ÉLÉMENTS SENSIBLES À L'OXYDO-RÉDUCTION (ARSENIC, CHROME, ANTIMOINE, AZOTE)

Effet de cycles redox (aérobie/anaérobie)

Codirection Université Waterloo (Canada) et Université de Grenoble Alpes - IS Terre

Des travaux expérimentaux sur l'effet des oscillations redox (alternance de milieux aérobie-anaérobie) sur le comportement d'éléments sensibles et leur modélisation géochimique, ont été réalisés dans le cadre de la thèse d'**Ekaterina Markelova** soutenue le 14 décembre 2016 à l'Université de Waterloo (Canada). Les réactions redox peuvent contrôler la spéciation et la mobilité des éléments majeurs comme le carbone, l'azote, le fer et le manganèse, et des éléments traces comme l'arsenic, l'antimoine et le chrome. Le travail effectué dans le cadre de cette thèse a permis d'apporter des éléments de compréhension sur le rôle que jouent les conditions redox sur les cycles biogéochimiques et la mobilité des éléments, en caractérisant et en quantifiant les processus physico-chimiques primordiaux.

LES MEMBRES DU CONSEIL SCIENTIFIQUE ET DES COMITÉS SCIENTIFIQUES SPÉCIALISÉS

Les membres du Conseil Scientifique 2015-2020	
Eduardo ALONSO	Président de l'Université Polytechnique de Catalogne (Espagne)
Philippe BEHRA	Professeur des universités – École Nationale Supérieure des Ingénieurs en Arts Chimiques Et Technologiques (ENSIACET) – Institut National Polytechnique (INP) de Toulouse
Marc DEMARCHE	Directeur général de l'ONDRAF (Belgique)
Christian FOUILLAC	Directeur de la Recherche du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) jusqu'en 2010 Président du Conseil Scientifique
Gabrielle HECHT	Professeur au département d'Histoire de l'Université de Stanford (États-Unis)
Isabelle HERLIN	Directrice du centre de l'Inria Lille - Nord Europe
Philippe OLLAR	Chef du département « Matériaux et Mécanique des Composants » – EDF R&D
Roger SALAMON	Président du Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP) Directeur honoraire de l'Institut de Santé Publique, d'Épidémiologie et de Développement (ISPED)
Stéphanie THIEBAUT¹	Directrice de l'Institut Écologie et Environnement du CNRS
Jean-Michel TORRENTI	Directeur adjoint du département « Matériaux et structures » de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)
Pierre TOULHOAT	Directeur général délégué, directeur scientifique et directeur de l'Institut Carnot du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)
Yves BRECHET	Haut-Commissaire à l'Énergie Atomique, membre de droit

1. A démissionné en décembre 2016

Les membres du COS 2015-2020

	Thématiques/Compétences	Noms	Éléments de CV
10 membres	Géotechnique et génie civil	Alain VANCOTHEM ²	Chef de Projets à la section Geotechnics et Structures de Tractebel (Belgique)
		Michel DEFFAYET ³	Directeur du CETU (Centre d'étude des tunnels)
	Comportement thermo-hydro-mécanique des composants du stockage (milieu géologique et matériaux ouvragés)	Mehdi GHOREYCHI ⁴	Directeur scientifique de l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS)
	Géochimie (milieu géologique, matériaux)	Laurent MICHOT	Directeur de recherches 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 »

2. A démissionné en décembre 2016

3. A été nommé en février 2017

4. A démissionné en mai 2017

Les membres du COS-OPE de 2015 à 2020

	Thématiques/Compétences	Noms	Éléments de CV
8 membres	Atmosphère	Gilles BERGAMETTI	Directeur de recherche au CNRS
	Géochimie Hydrologie	Jérôme GAILLARDET	Professeur à l'Institut de Physique du Globe de Paris
	Hydrogéologie	Frédéric DELAY	Professeur à l'Université de Strasbourg
	Agronomie Science du sol	Marc VOLTZ	Directeur de recherche à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)
	Écologie Hydrologie	Yvan LAGADEUC	Professeur à l'Université de Rennes I Président du COS-OPE
	Écologie (biodiversité)	Nathalie MACHON	Professeur au Museum d'Histoire Naturelle de Paris
	Géochimie	Frédéric VILLIERAS	Directeur de recherche au CNRS Vice-Président du Conseil Scientifique de l'Université de Lorraine
	Environnement	Stéphanie THIEBAULT ⁵	Directrice de l'Institut Écologie et Environnement du CNRS Membre du Conseil Scientifique de l'Andra

Les membres du COESDIC

Michel CALLON	Sociologue, École des Mines de Paris
Anne BERGMANS	Sociologue, Université d'Anvers (Belgique)
Pierre-Benoît JOLY	Économiste et sociologue, directeur de recherche à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)
Saida LAAROUCI-ENGSTRÖM	Vice-présidente de SKB (Suède)

5. A démissionné en décembre 2016

TABLE DES SIGLES

AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique	IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
Amorad	Amélioration des modèles de prévisions de la dispersion et de l'évaluation de l'impact des radionucléides au sein de l'environnement	Ineris	Institut national de l'environnement industriel et des risques
AMSC	Actions Marie Sklodowska-Curie	Inra	Institut national de la recherche agronomique
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs	Inserm	Institut national de la santé et de la recherche médicale
ANR	Agence nationale de la recherche	IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
APOS	<i>Asia-Pacific optical sensors</i>	Iter	<i>International thermonuclear experimental reactor</i>
ASN	Autorité de sûreté nucléaire	Joprad	<i>Joint programming on radioactive waste disposal</i>
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières	LNE	Laboratoire national de métrologie et d'essais
Cadet	Cavitation assistée pour la décontamination des eaux	LUE	Lorraine université d'excellence
CERN	<i>European organization for nuclear research</i>	MA-VL	Moyenne activité à vie longue
Cetim	Centre technique des industries mécaniques	MCO	Matériaux-Corrosion
Cetu	Centre d'étude des tunnels	MOX	Mélange d'oxydes
Cigéo	Centre industriel de stockage géologique	Ondraf	Organisme national belge des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies
CNE2	Commission nationale d'évaluation	OPE	Observatoire pérenne de l'environnement
CNRS	Centre national de la recherche scientifique	Oxgault	Oxydation des argiles du Gault
Coesdic	Comité d'expertise et de suivi de la démarche d'information et de consultation	Pivic	Procédé d'incinération-vitrification <i>in can</i>
COS	Comité d'orientation et de suivi du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne	REs	<i>Research entities</i>
COS-OPE	Comité d'orientation et de suivi de l'Observatoire pérenne de l'environnement	RDS	Rapport de sûreté
COX	Callovo-Oxfordien	RSNR	Recherche en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection
CSA	Centre de stockage de l'Aube	SFO	Société française d'optique
CSM	Centre de stockage de la Manche	SKB	<i>Swedish nuclear fuel and waste management</i>
DAC	Demande d'autorisation de création	SPCTS	Science des procédés céramiques et de traitement de surface
DOS	Dossiers d'options de sûreté	Temporal	Spectromètre imageur de rayons gamma
DORec	Dossier d'options techniques de récupérabilité	TFA	Très faible activité
EJP	<i>European joint programme</i>	THM	Thermo-hydro-mécanique
FA-VL	Faible activité à vie longue	TRIPS	<i>Transfer of radionuclides in perennial vegetation systems</i>
FINESSE	<i>Fibre nervous sensing systems</i>	TSOs	<i>Technical support organisations</i>
FOH	Facteurs organisationnels et humains	VMC	Voussoirs monoblocs compressibles
GVA	Galerie voussoir anisotrope	WMOs	<i>Waste management organisations</i>
HA	Haute activité	ZIRA	Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie
HCSP	Haut conseil de la santé publique	ZT	Zone de transposition
IFPEN	IFP Énergies nouvelles		
IFSTTAR	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux		



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