

AUTOMNE 2025 N° 52

le Journal de l'Andra

— ÉDITION MEUSE/HAUTE-MARNE

**Stockage des
déchets radioactifs :**
les secrets de l'argile

P.10



Sommaire

en bref

- P.4** Demande d'autorisation de création de Cigéo : une nouvelle étape franchie
- P.5** Retour sur nos visites estivales



- P.5** Rapport de la Cour des comptes : une solidité financière et des défis à venir pour l'Andra

tableau de bord

- P.6** Les 25 ans du Laboratoire souterrain en chiffres clés

territoire

- P.7** Des truites pour la Saulx : l'Andra aux côtés des pêcheurs



- P.8** Travaux préparatoires à Cigéo : faisons le point
- P.9** L'inclusion au cœur de l'action de l'Andra

dossier



P.10 Dossier

Stockage des déchets radioactifs : les secrets de l'argile

- P.11** Argile, qui es-tu ?
- P.13** Un matériau multifonction pour le stockage
- P.15** Plongée au cœur de la roche argileuse
- P.17** L'argile, une passion d'experts
- P.18** Stockage en profondeur : que font nos voisins ?
- P.19** Une roche modèle pour la recherche géologique

portrait

- P.20** Lydie Evrard, directrice générale de l'Andra

l'invité

- P.21** Le CEA, 80 ans au cœur des défis scientifiques et technologiques

reportage

- P.22** Cigéo : un démonstrateur pleine échelle pour confirmer l'étanchéité des hottes de transfert et des façades MA-VL

décryptage

- P.24** Sous-marins nucléaires : des producteurs de déchets « ordinaires » !
- P.26** Les inventaires de Cigéo
- P.28** Gestion des déchets radioactifs au Canada : les projets de stockage progressent

innovation

- P.29** Robotique autonome : l'Andra et les industriels exposent leurs avancées

entre nous

- P.30** On vous répond
Peut-on visiter les installations de l'Andra ?
- P.30** #Ils sont venus nous voir
- P.31** Photomystère

le
Journal
de l'Andra

Édition Meuse/Haute-Marne N° 52

Centre de Meuse/Haute-Marne
CMHM RD 960 - BP9 - 55290 - Tél. : 03 29 75 89 60 - journal-andra@andra.fr

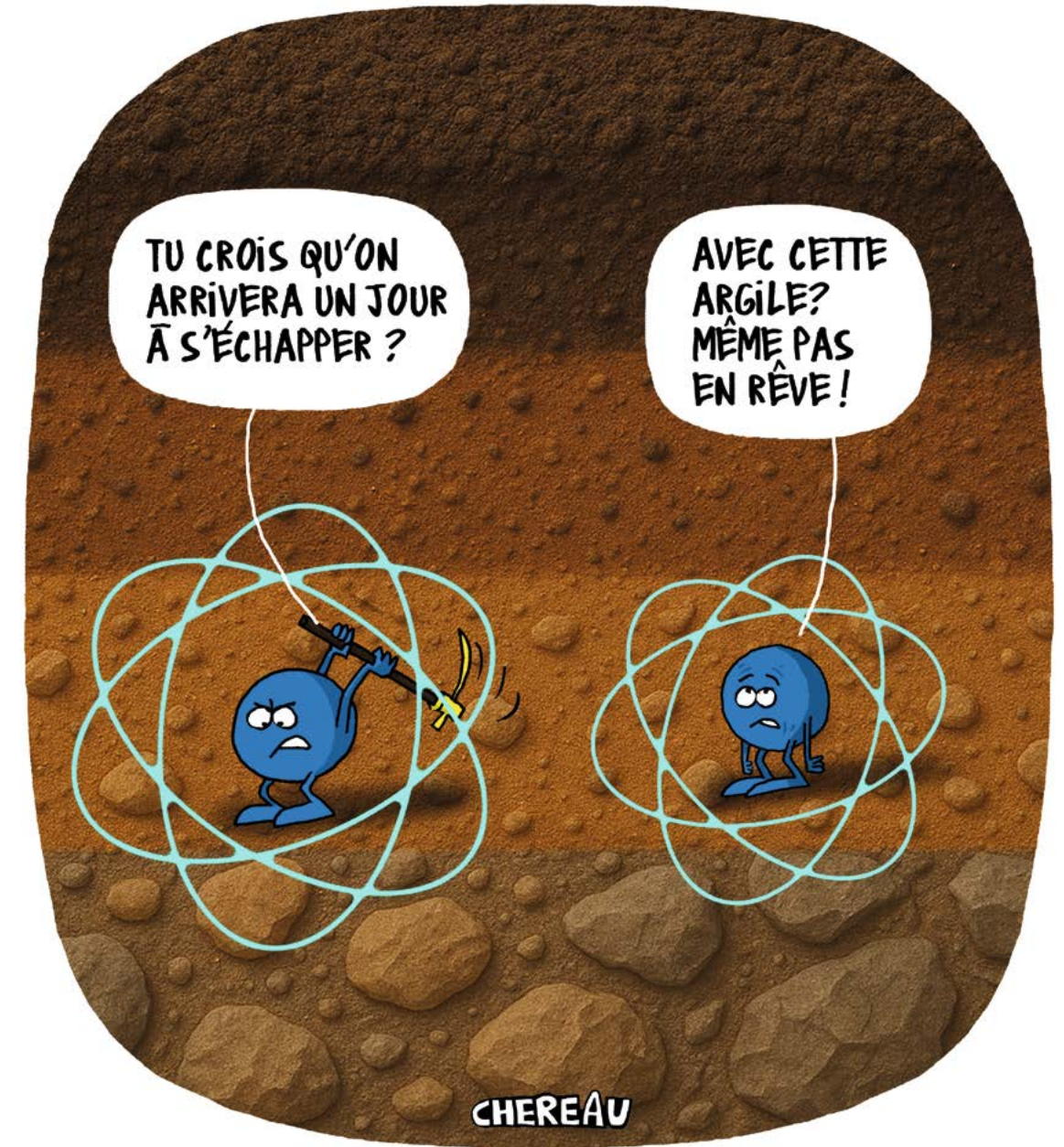
Directrice de la publication : Lydie Evrard • Directeur de la rédaction : Antoine Billat • Rédacteur en chef : Damien Maury-Tarriet • Ont participé à la rédaction : Alexia Attali, Isabelle de Buyer, Valérie Lachenaud, Séverine Vallat • Responsable iconographie : Sophie Muzerelle • Crédits photos : Andra, CEA, D. Champion, M. Chappet, A. Daste, Ph. Demail, N. Dohr, F. Dunouau, Getty Images, Handiprint, Kazar, Laboratoires nucléaires canadiens, Marine nationale / Christophe Giral (Creative Commons), E. Nau / IC2MP, NWMO / SCDN, Obiyou, C. Rivard / LIEC, R. Spekking / CC BY-SA 4.0 (via Wikimedia Commons) • Dessins : Antoine Chereau • Infographies et illustrations : Antoine Levesque, Maxime Chiappet, Citizen Press • Conception et réalisation : Citizen Press, Paris : www.citizen-press.fr • Impression : B LG Toul - Siret 43761704600044 - Imprimé sur du papier issu de forêts durablement gérées dans une imprimerie certifiée Imprim'vert • © Andra - DDP/DICOM/25-0042 • ISSN 2106-8291 (imprimé), ISSN 3037-0256 (en ligne) • Tirage : 195 650 ex.



ABONNEMENT GRATUIT

Pour être sûr de ne rien manquer sur l'actualité de l'Andra, **abonnez-vous par mail à journal-andra@andra.fr**, en précisant la ou les édition(s) souhaitée(s).

LE POINT DE VUE DE CHEREAU Évasion impossible.



Naturellement imperméable et stable, l'argile constitue une barrière géologique efficace pour confiner les substances radioactives et ralentir leur migration. Ses propriétés sont étudiées de près par l'Andra afin de contribuer à la sûreté des stockages sur le très long terme. Le dossier de ce numéro revient sur le rôle clé de cette roche, notamment pour le projet Cigéo. Rendez-vous en page 10.

815

C'est le nombre de visiteurs qui ont assisté à notre soirée portes ouvertes le samedi 13 septembre. Un succès pour cette nouvelle édition !



L'un des premiers projets retenus : un équipement mobile de traitement sanitaire des ovins.

Nouvelle session d'appel à projets « compensation collective agricole »

L'Andra, en lien avec 21 parties prenantes réunies au sein d'un comité de pilotage, lance une nouvelle session de l'appel à projets destiné aux exploitants et industriels du secteur agricole. Objectif : soutenir la mise en œuvre de projets novateurs, dans le cadre de la compensation collective agricole liée au projet Cigéo. Cet engagement vise à accompagner et à dynamiser le territoire en mobilisant des initiatives durables et adaptées aux enjeux locaux. Environ 2,1 millions d'euros ont été engagés à ce jour, soit la moitié du fonds de compensation collective agricole. Les porteurs de projets trouveront sur le site d'information le règlement complet ainsi que le dossier de candidature à télécharger. La date limite de candidature est fixée au 15 décembre 2025 pour cette 5^e session.

En savoir plus : <https://urls.fr/oyqGU>

Demande d'autorisation de création de Cigéo : une nouvelle étape franchie

Début juillet, l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR) a publié une information sur l'évaluation de la sûreté après fermeture de Cigéo. Il s'agit de la troisième et dernière étape de l'instruction technique de la demande d'autorisation de création (DAC) du projet. L'ASNR estime « pertinente la démarche de l'évaluation de la sûreté de Cigéo après sa fermeture retenue par l'Andra, fondée sur l'évaluation de la capacité globale de confinement de l'installation [...] ». Les besoins de compléments identifiés par l'ASNR ont tous fait l'objet d'engagements de la part de l'Andra. Ces engagements portent par exemple sur l'intégration et l'évaluation de l'impact d'un nouveau scénario appelé « abandon du stockage » ou sur des compléments de justification de certains choix d'optimisation. Le document de l'ASNR conclut plus généralement que la démonstration de sûreté de Cigéo, en exploitation et après sa fermeture, a globalement atteint le niveau de maturité requis à ce stade de développement du projet. Prochaine étape : sur la base des différents avis émis durant l'instruction et de la conclusion générale, l'ASNR émettra un avis attendu en novembre 2025.



En savoir plus : <https://urls.fr/aR2Ib->

danslesmédias

Voyage au cœur des déchets radioactifs



Sur sa chaîne YouTube, suivie par plus de 190 000 abonnés, le vidéaste Obiann se penche sur des sujets complexes qu'il rend accessibles avec humour. Dans l'une de ses dernières vidéos, il décrypte l'origine des déchets radioactifs, leur dangerosité, ainsi que leur classification et les solutions de gestion associées. Une introduction claire et pédagogique pour découvrir le sujet. Envie d'en savoir plus ? Patience : dans une prochaine vidéo, Obiann poussera les portes du Laboratoire souterrain de l'Andra pour découvrir les coulisses de Cigéo, le projet de stockage profond de déchets radioactifs.

Découvrir la vidéo : <https://urls.fr/KvNHqe>

Retour sur nos visites estivales

Du 9 juillet au 24 août, l'Andra a ouvert ses portes au public avec une programmation variée de visites et d'animations qui a attiré 548 visiteurs. L'exposition « Dessus/Dessous » était accessible tout l'été pour découvrir le parcours d'un colis de déchets radioactifs dans Cigéo, de sa production à sa mise en stockage. Un parcours ludique qui permet de comprendre toutes les facettes du projet, des bâtiments de surface (le « dessus ») aux alvéoles de stockage souterrain (le « dessous »). À l'Écothèque, le parcours « Ça fourmille dans la prairie » invitait petits et grands à observer la nature locale : grenouilles vertes, tritons, insectes... Une déambulation riche en découvertes à travers les milieux naturels du territoire. Nos visiteurs étaient principalement issus de la région Grand Est, avec en tête le département de la Meuse, puis de la Haute-Marne et de la Meurthe-et-Moselle.

Vous souhaitez nous rendre visite ? Rendez-vous dans la rubrique « information et visites » sur meusehautemarne.andra.fr



Le parcours extérieur de l'Écothèque.

Rapport de la Cour des comptes : une solidité financière et des défis à venir pour l'Andra



L'été dernier, la Cour des comptes a rendu public son rapport sur les comptes et la gestion de l'Andra pour les exercices 2018 à 2024. Elle évoque une situation financière « saine et robuste » de l'Agence, dont le modèle économique est fondé sur la responsabilité des producteurs de déchets radioactifs, un principe inscrit dans le code de l'environnement. Concernant le projet Cigéo, la Cour des comptes précise que « portée

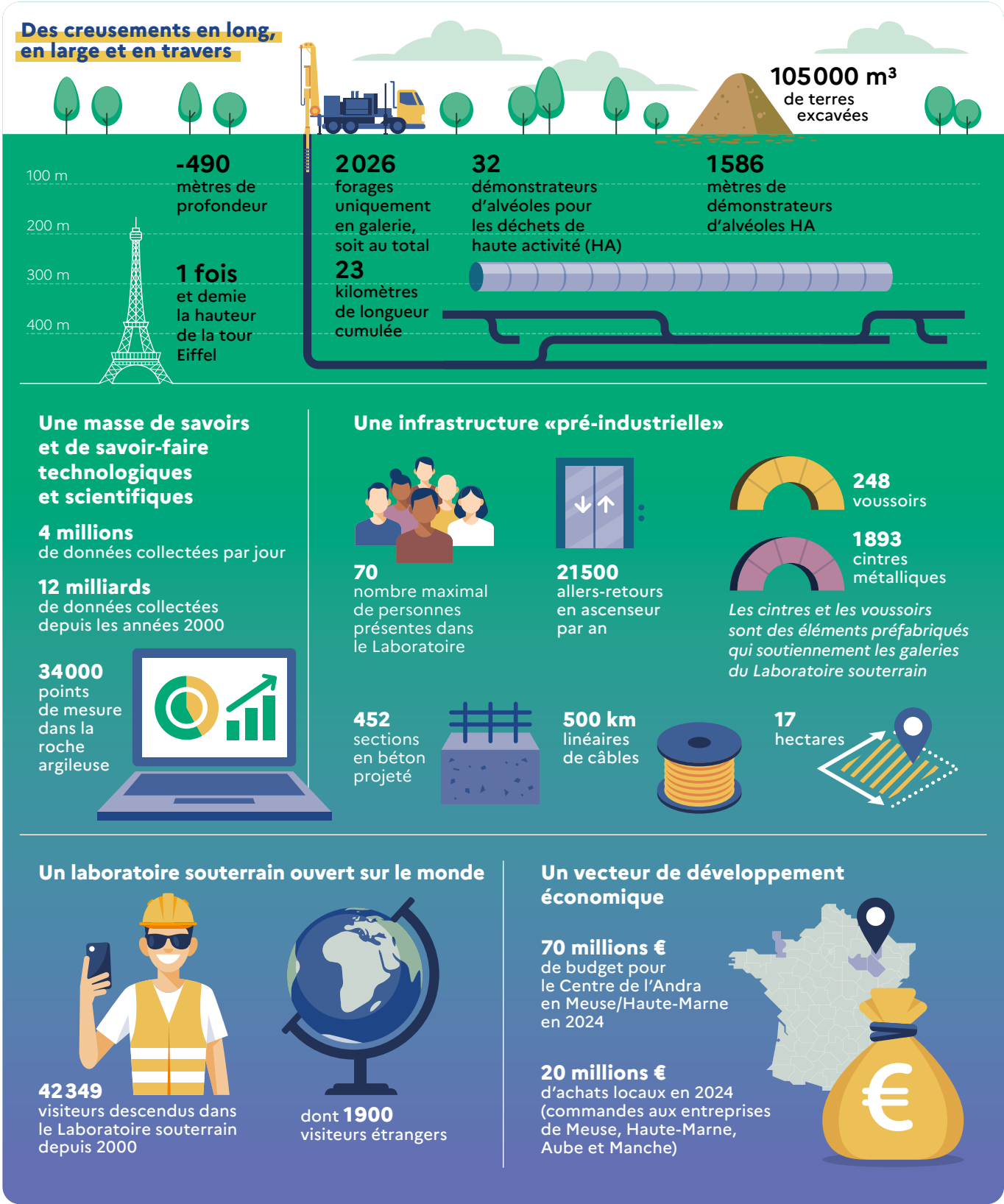
par un pilotage stratégique efficient, l'Agence a franchi de nombreux jalons au cours de la période sous revue, adaptant sa gouvernance, son organisation, sa gestion des ressources humaines, des achats et du système d'information », notant au passage que « l'Andra a démontré une forte capacité d'adaptation, gérant le projet de manière prudente et progressive ». Plusieurs recommandations sont également émises. Elles portent

principalement sur des compléments qui permettraient de renforcer la lisibilité de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs, la poursuite des études et l'élaboration de projets pour gérer les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL), et la maîtrise de la phase de construction de Cigéo, s'il est autorisé.

Consulter le rapport : <https://urls.fr/d9K2Xr>

Les 25 ans du Laboratoire souterrain en chiffres clés

Depuis 2000, les expérimentations et essais n'ont cessé de se multiplier au Laboratoire souterrain, faisant de ce dernier une infrastructure scientifique unique.



Des truites pour la Saulx : l'Andra aux côtés des pêcheurs

Depuis dix ans, l'Andra soutient l'Association agréée de pêche et de protection du milieu aquatique (AAPPMA) Le Héron d'Haironville, une association qui mène des campagnes d'alevinage pour repeupler la Saulx.



Préparation des œufs avant leur mise en place.

Au sein de leur association, les pêcheurs ne se contentent pas de taquiner le poisson : depuis plusieurs années, ils s'engagent activement pour le repeuplement de la Saulx, notamment par la mise à l'eau de truites adultes. En 2015, une autre démarche a été lancée à titre expérimental : l'introduction d'œufs de truite. « Cette opération est plus complexe, mais elle s'avère payante, car les truites qui grandissent dans la rivière

ont appris à se cacher. Elles ont donc plus de chances de survivre et de se reproduire ici », explique Xavier Champion, secrétaire de l'association.

Viser le long terme

Concrètement, chaque année entre fin décembre et début février, l'association élève des œufs de truite abrités dans des tuyaux installés dans une zone dédiée de la rivière. Les alevins vivants sont ensuite disséminés dans la Saulx. Environ 5 % atteindront l'âge adulte. « Au départ, nous introduisons un mélange d'adultes et d'alevins. Puis, nous nous sommes concentrés sur les œufs. Nous avons commencé par 500 et nous en avons 200 000 cet hiver », détaille Xavier Champion. Pour financer cette démarche, l'association s'est tournée vers des acteurs locaux. Parmi eux : l'Andra, qui a répondu à l'appel et poursuit son soutien au fil des ans. Une régularité précieuse pour l'association, qui a besoin

LES PARRAINAGES DE L'ANDRA

Désireuse de s'impliquer dans les territoires qui l'accueillent, l'Andra a défini une charte des parrainages précisant les principes d'attribution de ses subventions. Les projets doivent entrer dans des domaines bien définis : la diffusion de la culture scientifique et technique, la découverte et la protection de la nature et de la biodiversité, la transmission de la mémoire et la sauvegarde du patrimoine, les actions en faveur de la solidarité et de la cohésion sociale, et enfin l'accompagnement de la vie locale.



Les alevins sont dispersés dans la rivière.



En savoir plus : <https://urls.fr/k-wuMk>



Travaux préparatoires à Cigéo : faisons le point

Les premières opérations de caractérisation et de surveillance environnementale (dites « opérations DR0 ») du projet Cigéo ont démarré. L'occasion de faire le point sur ces travaux et les dernières étapes de leur parcours d'instruction.

Déposée au printemps 2024, la demande d'autorisation des premiers travaux préparatoires à Cigéo a achevé son parcours d'instruction. Ces travaux ne marquent pas le démarrage de la construction de Cigéo, mais permettent d'approfondir la connaissance de l'environnement du point de vue géologique, hydrogéologique (étude des eaux souterraines), géotechnique (étude des sols) et historique, avec la réalisation de diagnostics et de fouilles archéologiques.

Avis favorable

Pour être autorisés, ces travaux ont été soumis à une enquête publique qui s'est déroulée

du 28 février au 15 avril 2025. Pendant toute sa durée, trois commissaires enquêteurs ont assuré des permanences dans plusieurs communes pour écouter le public, noter les remarques formulées et répondre aux questions. 767 avis ont été déposés, dont une majorité en ligne. À l'issue de l'enquête, les commissaires enquêteurs ont formulé un avis public favorable accompagné de recommandations. Fortes des avis des collectivités territoriales, du public et de la commission d'enquête, les préfectures de la Meuse et de la Haute-Marne ont examiné l'ensemble de ces éléments et délivré fin juillet les autorisations nécessaires à la réalisation des travaux.

Le point sur les premières opérations

Les travaux ont démarré en septembre. Il s'agit notamment de campagnes géotechniques menées par l'Andra. Par ailleurs, un transfert partiel d'autorisation environnementale a été effectué au profit de SNCF Réseau et du conseil départemental de la Haute-Marne afin de leur permettre de mener les investigations dans les secteurs concernés par les opérations dont ils assurent la maîtrise d'ouvrage. SNCF Réseau mènera ainsi ses propres études sur la ligne ferroviaire 027000 (Nançois-Tronville – Gondrecourt-le-Château), et le conseil départemental sur le projet de déviation de la RD 60/960. Ces travaux serviront aussi à étudier le sous-sol sur 60 hectares afin de caractériser l'intérêt des éventuels vestiges archéologiques et de mettre en œuvre toutes les conditions qui permettront leur préservation, leur enregistrement et leur conservation. Ces travaux seront engagés par l'Andra en 2026. ●



Consultez le dossier, le rapport et les conclusions de l'enquête publique :

<https://urls.fr/jMRzSw>



Forage réalisé dans le cadre des travaux préparatoires à Cigéo.



Les équipes de l'ADASMS en action à l'espace technologique.

L'inclusion au cœur de l'action de l'Andra

Depuis quatre ans, l'Andra se mobilise et contribue à l'insertion des personnes en situation de handicap.



En 2021, après avoir fait dresser un état des lieux par l'Agefiph⁽¹⁾, l'Andra a créé une mission handicap, avec des relais dans les différents sites de l'Agence. Son but : rendre accessible les sites de l'Andra à toutes et à tous, quel que soit le handicap. C'est à cette époque que Catherine Nicolas a été nommée référente handicap à l'Agence. « Des actions existaient, mais nous devons recenser et analyser les données pour nous structurer, et clarifier nos priorités en matière de handicap », explique-t-elle. L'un des axes de travail a été de sensibiliser davantage au handicap en interne à travers des campagnes d'e-mailing, des webinaires, des événements internes ou encore des jeux pédagogiques. « C'est un sujet souvent méconnu, estime Catherine Nicolas. Nous avançons progressivement en

essayant d'impliquer chacun de nos collègues. » Autre enjeu : accompagner les collaborateurs en situation de handicap, et ce dès leur recrutement. « Nos offres sont publiées sur le site de l'Agefiph et nous évoquons en entretien les éventuelles adaptations de poste de travail qui pourraient être nécessaires », précise Catherine Nicolas. Résultat : le taux d'emploi de personnes en situation de handicap est passé de 3,09% en 2021 à 4,14% en 2024.

Des partenariats avec le secteur protégé

L'Andra a également noué des partenariats avec des structures adaptées comme les Esat⁽²⁾. Une démarche qui permet à ces établissements de faire travailler durablement des personnes en situation de handicap dans un environnement professionnel aménagé. Depuis 2013, l'Association d'Action Sociale et Médico-Sociale (ADASMS) entretient ainsi les espaces verts du Centre de Meuse/Haute-Marne. Une vingtaine de personnes présentant des troubles psychiques et/ou intellectuels se relaient pour cette mission, sous l'encadrement de quatre professionnels du secteur. « Chacun se sent reconnu pour

son travail, car l'Andra manifeste concrètement sa satisfaction auprès des équipes, souligne Christophe Camonin, adjoint technique à l'ADASMS. C'est important pour accompagner la montée en compétences et le gain d'autonomie. » ●

(1) Depuis 1987, l'Agefiph (Association de gestion du fonds pour l'insertion professionnelle des personnes handicapées) soutient le développement de l'emploi et le maintien en poste des personnes en situation de handicap dans les entreprises du secteur privé.
(2) Les établissements et services d'accompagnement par le travail (Esat) sont des structures qui permettent aux personnes en situation de handicap d'exercer une activité professionnelle tout en bénéficiant d'un soutien médico-social et éducatif dans un milieu protégé.

LE RÔLE DU RÉFÉRENT HANDICAP À L'ANDRA

Accompagné par la direction des Ressources humaines, le référent handicap structure et coordonne la politique handicap de l'Agence, sensibilise les équipes et accompagne les collaborateurs en situation de handicap. Pour cela, il s'appuie sur des relais de proximité présents sur chaque site de l'Agence. Il est également en lien avec différentes structures, comme l'Agefiph, les services de santé au travail, les Esat.



Stockage des déchets radioactifs : les secrets de l'argile

Matériau naturel aux multiples vertus, l'argile intéresse et passionne les scientifiques dans le monde entier. Ses propriétés intéressent notamment les organismes en charge de la gestion des déchets radioactifs, aussi bien pour leur stockage en surface qu'en profondeur. Que sait-on aujourd'hui de l'argile ? Comment peut-elle nous protéger des dangers que présentent les déchets radioactifs ? Un bilan complet dans ce dossier.



Carotte d'argile du Callovo-Oxfordien examinée au microscope.

Argile, qui es-tu ?

Utilisée depuis des millénaires à des fins domestiques, artistiques ou informatives, l'argile recèle des propriétés particulièrement intéressantes pour le stockage des déchets radioactifs.

L'argile est une roche « pratique » : très vite, les femmes et les hommes préhistoriques ont compris qu'ils pouvaient facilement la modeler et lui ont trouvé des usages grâce notamment à son imperméabilité. Les géologues parlent d'ailleurs « des argiles », car différents types de roches argileuses existent en milieu naturel. Elles sont classées selon leur teneur en minéraux argileux et en autres minéraux (quartz, carbonates, feldspaths, sulfures...), et suivant leur texture. Ces argiles se sont formées il y a des millions d'années, lorsque d'immenses océans recouvraient la Terre. Les roches, lentement usées par l'eau, se transformaient en de minuscules grains et particules. En même temps, les coquillages, algues et animaux marins laissaient derrière eux des débris organiques. Tous ces éléments se sont déposés ensemble au fond des mers et des lacs, couche après couche : la sédimentation a ainsi donné naissance aux argiles.

Une roche idéale pour le stockage

« À l'Andra, plusieurs types de roches argileuses nous intéressent », expliquent Nicolas Michau, ingénieur matériaux argileux, et Benoît Madé, ingénieur géochimiste. Il s'agit des argilites du Callovo-Oxfordien, une roche argileuse dure étudiée dans le cadre du projet Cigéo, des argiles à Plicatules de l'Aptien-Barrémien pour les

centres de stockage en surface de l'Aube, et enfin des argiles dites « téglines » étudiées pour le futur stockage à faible profondeur d'une partie des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL). » Toutes les couches argileuses étudiées par l'Andra répondent à plusieurs critères indispensables : épaisseur de la formation, homogénéité minéralogique, absence de failles, lente circulation de l'eau (faible

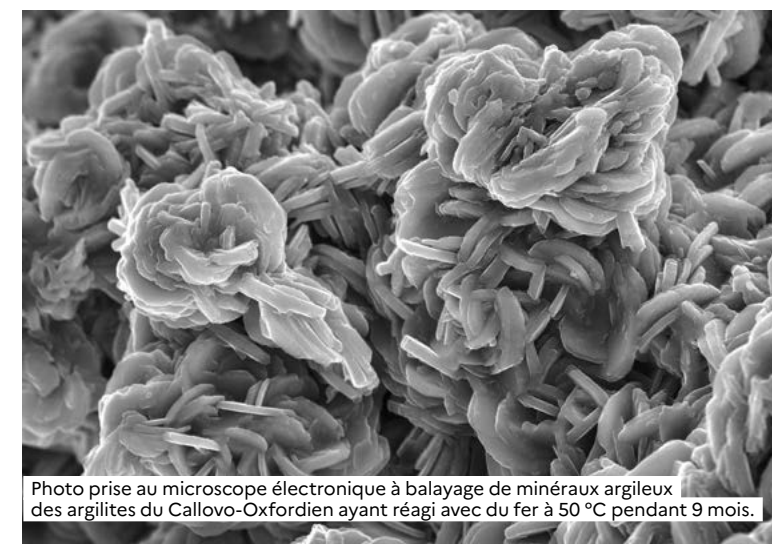
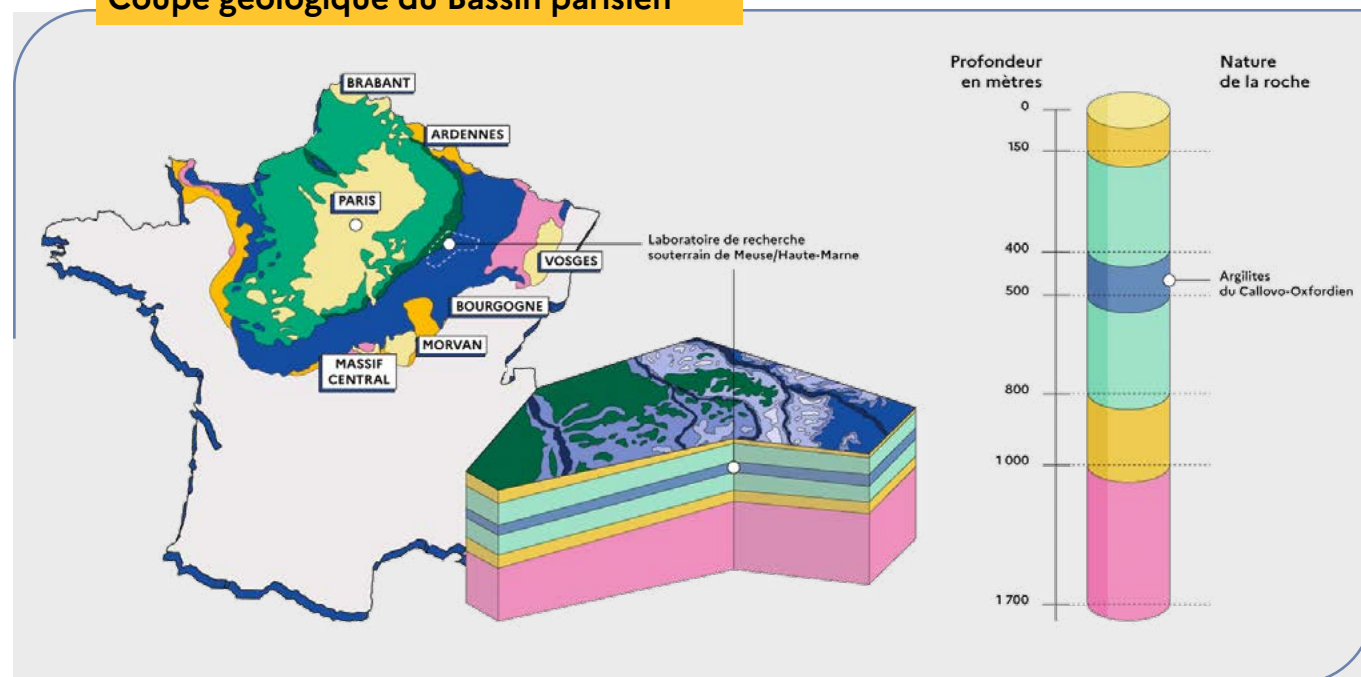


Photo prise au microscope électronique à balayage de minéraux argileux des argilites du Callovo-Oxfordien ayant réagi avec du fer à 50 °C pendant 9 mois.

Coupe géologique du Bassin parisien



perméabilité), qualités mécaniques et planitude adaptée au creusement d'ouvrages.

Une barrière naturelle contre la circulation de l'eau et la pollution

L'argile a deux avantages qui la rendent très utile pour empêcher l'eau de circuler et les substances de se disperser dans la nature. On s'y intéresse donc pour stocker les déchets radioactifs : elle est peu perméable et confine bien les produits chimiques. L'eau joue un rôle clé dans ce processus, car elle peut corroder les colis métalliques, altérer les matériaux du stockage et transporter les substances radioactives à travers le milieu géologique, favorisant leur dispersion dans l'environnement.

Du fait de ses caractéristiques, l'argile agit ainsi comme une barrière naturelle à la dispersion des éléments chimiques ou radioactifs. Les minéraux argileux sont formés de fines couches superposées et très serrées, comme un mille-feuille, leur conférant leur propriété d'imperméabilité. La roche a la capacité de retenir durablement les substances

radioactives chargées positivement, tandis que celles chargées négativement migrent lentement. Elle a donc un avantage significatif par rapport à des sols plus perméables.

L'argilite au cœur de la sûreté du projet Cigéo

La roche argileuse du Callovo-Oxfordien a particulièrement été étudiée par l'Andra dans le cadre des recherches menées dans le Laboratoire souterrain. « Cette argilite est une roche argileuse indurée, c'est-à-dire cimentée par des cristaux de quartz et/ou des carbonates, dont la teneur en minéraux argileux est d'environ 40 % à 45 %. Elle forme une roche grise, homogène et sèche au toucher », expliquent Nicolas Michau et Benoît Madé.

Rappelons brièvement l'histoire du Callovo-Oxfordien : cette couche sédimentaire argileuse du Bassin parisien s'est déposée il y a environ 160 millions d'années dans une mer peu profonde qui recouvrait alors l'emplacement actuel du nord de la Haute-Marne et du sud de la Meuse. Sur la zone d'étude de Cigéo, elle mesure en moyenne 145 mètres

d'épaisseur et se trouve entre 400 et 600 mètres sous terre. Une profondeur suffisante pour ne pas être affectée par des phénomènes géologiques de surface (érosion, glaciation...).

L'ARGILE COMME MATÉRIAU DE TRANSMISSION

Au IV^e millénaire av. J.-C., en Mésopotamie, des artefacts d'argile (petits cailloux, bâtonnets, billes, cônes, imitations de coquillages) étaient employés pour dénombrer des marchandises. Ils étaient insérés dans des bulles-enveloppes, sortes de sphères d'argile creuses sur lesquelles on rappelait le décompte sous forme de pictogrammes obtenus par pression d'un calame (roseau taillé en pointe). Les tablettes plates ont fini par remplacer les bulles d'argile. Les plus anciennes conservées datent de 3500 à 3200 av. J.-C. : tables arithmétiques, registres, lois, textes religieux ou littéraires.

Un matériau multifonction pour le stockage

Quelles que soient sa profondeur ou sa composition, l'argile joue un rôle essentiel dans les solutions de stockage mises en œuvre ou étudiées par l'Andra.



La roche argileuse du Callovo-Oxfordien.

La roche argileuse du Callovo-Oxfordien pour le stockage géologique

Les recherches menées depuis 1991 sur le stockage géologique des déchets les plus radioactifs ont conduit à sélectionner une roche argileuse du bassin sédimentaire parisien, vieille de plus de 160 millions d'années. Les études menées par l'Andra au sein de son Laboratoire souterrain depuis les années 2000 ont confirmé que cette couche argileuse dispose de toutes les propriétés nécessaires : homogénéité, stabilité, profondeur, épaisseur. Cela lui confère une très faible perméabilité qui favorise la migration lente des éléments chimiques.

Si l'argile du Callovo-Oxfordien doit servir de « terre d'accueil » au centre de stockage Cigéo et former une barrière naturelle de protection, elle sera également utilisée pour remblayer les galeries creusées au moment de la fermeture.

L'argile de l'Aptien pour le stockage de surface

Au Centre de stockage de l'Aube (CSA), les ouvrages de stockage qui réceptionnent les colis de déchets de faible et moyenne activité

principalement à vie courte (FMA-VC) sont construits sur une couche de sable au-dessus d'une couche argileuse de l'Aptien, qui constitue la barrière géologique recherchée. À l'issue de la phase d'exploitation, l'argile sera également utilisée pour la couverture, disposée au-dessus des ouvrages de stockage pour les protéger des agressions extérieures, notamment les infiltrations d'eau. « Cette couverture sera composée de plusieurs couches de matériaux naturels, dont l'argile, explique Albert Marchiol, géologue, chef de projet Couverture au CSA. La couche d'argile, de par sa faible perméabilité, permettra de limiter la quantité d'eau de pluie susceptible d'entrer en contact avec les ouvrages de stockage. » Une structure expérimentale de couverture est à l'étude pour tester en conditions réelles le concept envisagé. « Nous étudions les effets de fortes pluies, mais aussi d'étés plus secs qui peuvent avoir des conséquences sur l'argile, poursuit Albert Marchiol. Les



UN SAVOIR-FAIRE RARE

« L'argile excavée est mise en dépôt sur le site du CSA en vue de la réalisation future de la couverture. Il existe un véritable savoir-faire pour ce stockage, qui est d'ores et déjà appliqué sur le site du Cires. »

Albert Marchiol,
géologue, chef de projet
Couverture au CSA

résultats de nos tests montrent que la couche de protection en surface protège suffisamment l'argile pour que nous respections nos engagements de sûreté. Notre concept est également conforté par le savoir-faire acquis sur le Cires. »

Le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) prend en charge les déchets de très faible activité (TFA). Ceux-ci sont



Pour s'assurer de l'efficacité de la couverture pendant la décroissance de la radioactivité des déchets (soit environ 300 ans), une structure expérimentale de couverture (SEC) est actuellement à l'étude sur le CSA.



Creusement d'une alvéole au Cires.

disposés dans des alvéoles de stockage creusées à quelques mètres de profondeur au sein de cette même couche d'argile de l'Aptien. L'alvéole est définitivement fermée par une couverture provisoire composée d'une couche de sable, d'une géomembrane garantissant l'imperméabilité du stockage et d'un géotextile de protection temporaire résistant aux rayonnements UV.

Une seconde couverture composée de plusieurs couches, dont de l'argile, est ensuite placée sur les alvéoles de stockage pour en assurer la protection contre les intempéries ou les intrusions. « Cette couverture est déjà effective sur une partie du site, explique Benoît Monguillon, responsable Terrassement au Cires. Nous avons utilisé l'argile excavée au

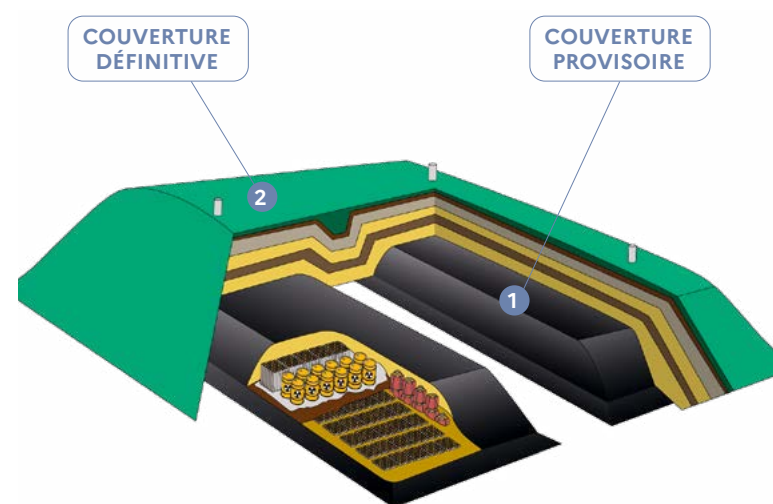
moment du creusement des alvéoles, et nous l'avons retravaillée pour lui rendre la plasticité nécessaire à sa mise en place. Grâce à des techniques éprouvées, nous pouvons l'hydrater rapidement afin de lui redonner la bonne teneur en eau, favoriser le bon compactage et assurer l'imperméabilité. »

Les argiles téglines : une solution pour les déchets FA-VL ?

Les déchets de faible activité à vie longue appartiennent à une catégorie hétérogène de déchets, qui regroupe des déchets de nature et d'origine

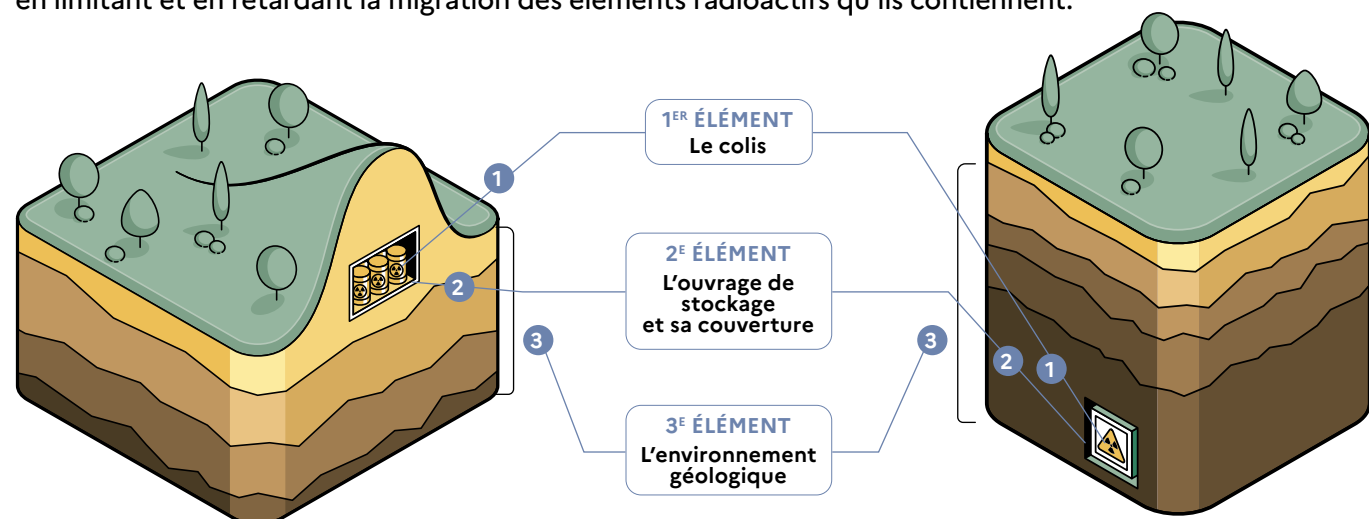
très différentes. Si les modes de gestion à long terme de ces déchets sont encore à l'étude, le principe d'un stockage en formation argileuse à faible profondeur (une trentaine de mètres) est l'une des options de référence pour une partie de ces déchets. C'est dans ce cadre que l'Andra a mené plusieurs campagnes d'investigations géologiques entre 2013 et 2015, puis entre 2017 et 2018, pour mieux connaître les argiles téglines présentes sur le territoire de la communauté de communes de Vendevre-Soulaines dans l'Aube.

SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA COUVERTURE DU CIRES



LE PRINCIPE DU STOCKAGE

Le stockage permet d'isoler les déchets des personnes et de l'environnement, en limitant et en retardant la migration des éléments radioactifs qu'ils contiennent.



Robot-chien dans les argilites du Callovo-Oxfordien.

Plongée au cœur de la roche argileuse

Le Laboratoire souterrain de l'Andra est un site privilégié pour étudier au plus près la couche argileuse du Callovo-Oxfordien. Depuis sa création, de nombreuses expérimentations ont été menées, contribuant à enrichir les connaissances.

On ne peut évoquer l'argile sans parler du Laboratoire souterrain de l'Andra. L'étude de cette roche sous tous ses aspects est sa raison d'être, comme le rappelle Émilie Huret, cheffe du Centre de Meuse/Haute-Marne : « Il a été créé pour étudier in situ ce milieu géologique et confirmer la faisabilité du principe de stockage profond pour les déchets radioactifs les plus dangereux. Durant les premières années, nous avons mené des expérimentations scientifiques afin d'éprouver la capacité de confinement de la roche argileuse et de compléter les données déjà acquises à partir d'échantillons sur ses caractéristiques mécaniques, thermiques, géochimiques et hydrauliques. »

Première étape : caractériser la roche

Dans un premier temps, les scientifiques ont caractérisé la roche argileuse et ses propriétés. « Les études ont porté notamment sur la composition de l'eau présente naturellement dans la roche, la perméabilité de la roche et le processus de diffusion et de rétention des éléments radioactifs », explique Jean-Charles Robinet, chef de département à la direction scientifique et technique.

À travers le creusement des puits du Laboratoire, des galeries souterraines ou des démonstrateurs d'alvéoles de stockage, l'Andra a vérifié que les couches géologiques traversées n'avaient pas été altérées par des phénomènes naturels tels que des séismes ou des épisodes de glaciations. Par ailleurs, le creusement des ouvrages engendre des perturbations qu'il faut limiter au maximum afin de préserver les propriétés favorables de la roche. Des capteurs ont été placés dans des forages pour cartographier l'endommagement de la roche. En complément, des tests ont démontré l'efficacité de

« bouchons » à base d'argile gonflante (bentonite) pour interrompre les éventuelles circulations d'eau dans les zones de roche endommagée à proximité immédiate des creusements. « Nous avons également étudié le comportement hydromécanique de la roche suite à un échauffement, car les déchets radioactifs de haute activité dégagent de la chaleur, explique Émilie Huret. Des sondes chauffantes ainsi que des capteurs à leur pourtour ont donc été placés dans les parois des galeries souterraines du Laboratoire souterrain. Aucun endommagement de la roche lié à la température n'a été observé. »



Creusement d'une galerie du Laboratoire de recherche souterrain dans l'argile du Callovo-Oxfordien.

Deuxième étape : faire interagir roche argileuse et matériaux

En 2006, l'Andra est entrée dans une nouvelle phase, le Parlement ayant entériné le choix du stockage profond et missionné l'Agence pour concevoir un centre de stockage dans la couche d'argile étudiée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. « Si les expérimentations menées sur la caractérisation de la roche argileuse continuent, il s'agit désormais de consolider les connaissances sur des temps d'observation longs, et d'approfondir l'analyse des interactions entre la roche et les matériaux du stockage : du verre et de l'acier pour les colis de déchets de haute activité, du béton pour les colis de déchets de moyenne activité et à vie longue ainsi que pour le revêtement/soutènement des galeries », explique Jean-Charles Robinet.

Des expérimentations et des essais ont ainsi été menés pour évaluer le processus de corrosion des aciers et la durabilité des bétons au contact de l'argile du Callovo-Oxfordien et, inversement, les effets des bétons et de l'acier sur la roche argileuse. Par ailleurs, les scientifiques ont conduit une expérimentation pour estimer la performance hydraulique des scellements à base d'argile gonflante (comme la bentonite) dans le cadre de la fermeture du stockage. « Nous avons démontré que la couche argileuse du Callovo-Oxfordien dispose de toutes les propriétés nécessaires pour accueillir le stockage des déchets radioactifs HA et MA-VL, conclut Émilie Huret. La formation est ultramonitorée, ce qui va nous permettre de suivre l'évolution de son comportement dans le temps et d'améliorer encore nos connaissances en vue de la construction de Cigéo. »

UNE FORMATION STABLE

Dès les années 1990, l'Andra a mené sur le site de Meuse/Haute-Marne des campagnes de géophysique, des forages, des mesures sismiques et des travaux de cartographie pour préciser la disposition des couches géologiques. Ces travaux ont confirmé que le milieu géologique était stable et que la probabilité qu'un séisme se produise sur le secteur était très faible. Les déformations tectoniques qui ont affecté la région depuis 150 millions d'années sont minimales et se limitent aux fossés en bordures du secteur d'étude.



Près de 500 chercheurs de 30 pays réunis à Nancy lors de la 8^e Clay conférence, autour de l'étude des matériaux argileux appliquée au stockage géologique.

Éric Ferrage,

directeur de recherche au CNRS affecté à l'Institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers (IC2MP), lauréat 2024 de la Société américaine des argiles

Le fil rouge d'une carrière...

« Je travaille sur la réactivité des argiles au contact avec l'eau et les polluants. J'ai fait ma thèse à l'Andra il y a vingt-cinq ans sur le sujet et j'ai continué depuis. L'argile m'intéresse car elle est complexe et présente dans tous les environnements. Avec l'Andra, je travaille sur la réactivité des argiles du Callovo-Oxfordien pour le stockage de Cigéo, et sur les mécanismes de diffusion de l'eau et des radionucléides. Je développe des jumeaux numériques pour simuler le milieu naturel, en faisant varier par exemple la porosité de la roche ou bien l'organisation des argiles dans le milieu. J'apprécie la démarche de l'Andra, qui finance des projets de recherche allant du plus fondamental au plus appliqué. Cela permet d'enrichir les connaissances sur l'argile de manière absolue et pas seulement en vue du stockage de déchets radioactifs ! »



(1) Bureau de recherches géologiques et minières.
(2) Centre national de la recherche scientifique.
(3) Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

L'argile, une passion d'experts

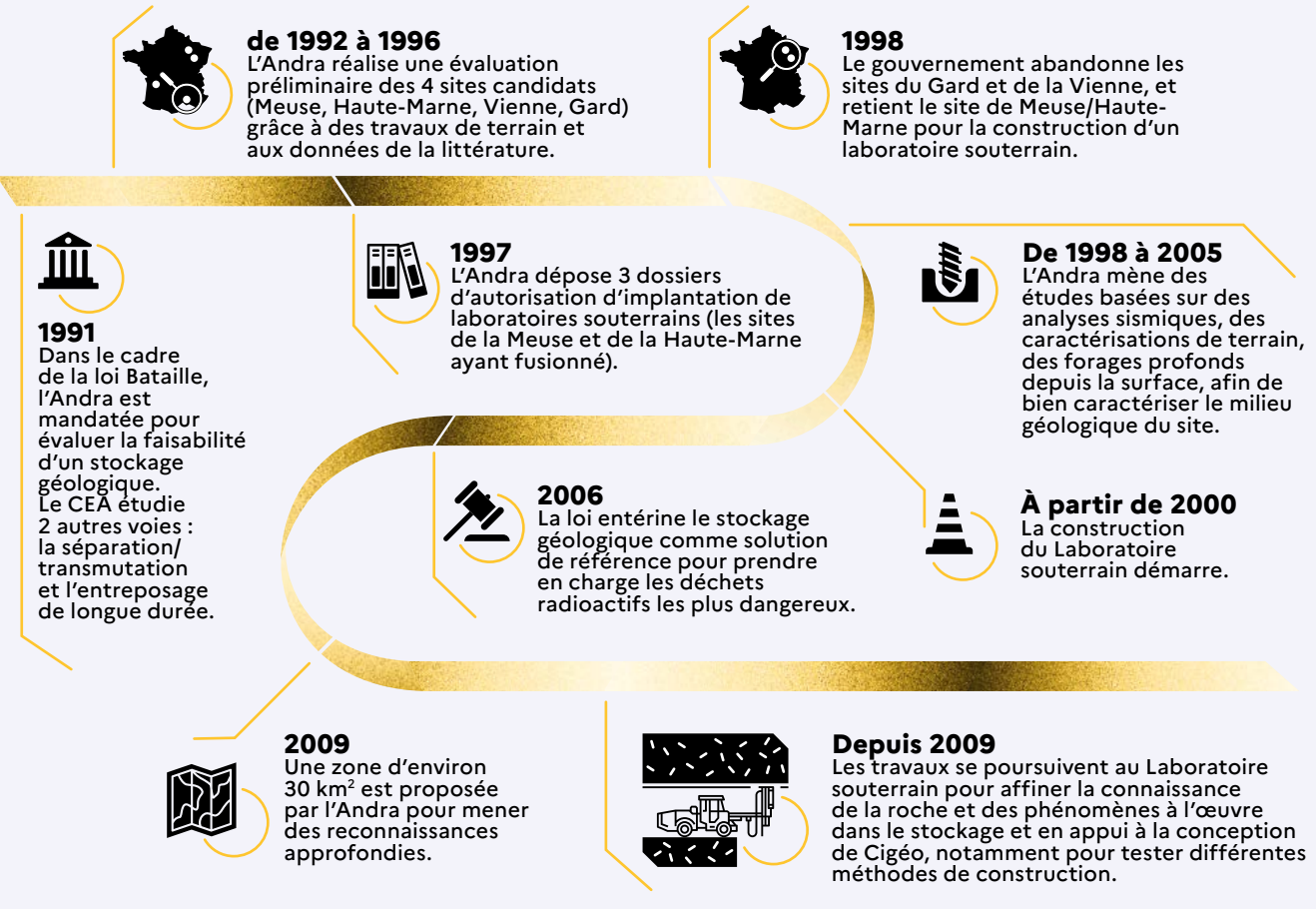
Roche familière et pourtant mystérieuse, l'argile intrigue les experts qui n'ont pas fini d'en explorer toutes les facettes. Mais qui sont ces spécialistes ?

« L'Andra compte une vingtaine de spécialistes chargés d'étudier l'argile sous ses différents aspects : mécanique, chimique, géologique, etc., expliquent Nicolas Michau, ingénieur matériaux argileux, et Benoît Madé, ingénieur géochimiste. Bien sûr, nous ne travaillons pas seuls : nous collaborons étroitement avec de nombreux experts, en France et à l'international. » Parmi ces partenaires figurent le BRGM⁽¹⁾, le CNRS⁽²⁾, le CEA⁽³⁾, l'université de Poitiers, l'École des ponts ou encore l'École des mines. « Nous échangeons également avec nos homologues internationaux en charge de la gestion des déchets radioactifs, ajoutent les deux ingénieurs. Enfin, l'Andra fait partie de l'association le Groupe français des argiles (GFA), branche française de l'Association internationale pour l'étude des argiles (AIPEA). C'est important pour valoriser nos recherches, échanger sur des problématiques ou encore découvrir de nouvelles avancées. »

Une conférence sur l'argile à l'initiative de l'Andra

Autre rendez-vous majeur des experts de l'argile : la conférence « Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement ». Initiée en 2002 par l'Andra, cette conférence scientifique réunit tous les deux ans et demi 400 à 500 experts de plus de 30 pays : organismes de gestion des déchets, chercheurs et spécialistes du domaine. La dernière édition s'est tenue en 2024 à Hanovre en Allemagne, et la prochaine aura lieu en 2027. Elle sera organisée conjointement par l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (Ondraf) et la Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (Covra), en charge de la gestion des déchets radioactifs respectivement en Belgique et aux Pays-Bas.

Les différentes étapes d'acquisition de connaissances pour le stockage profond



Stockage en profondeur : que font nos voisins ?

Les formations géologiques retenues pour le stockage en profondeur des déchets les plus radioactifs peuvent être diverses. Chaque pays s'adapte en effet aux caractéristiques de la roche, du site et des déchets concernés. Tour d'horizon européen.

L'argile en Suisse et en Belgique

En novembre 2024, la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (Nagra) a déposé une demande d'autorisation générale pour la réalisation d'un stockage profond au sein d'une couche d'argile, dans la région des Lägern, au nord de la Suisse. Prévue à environ 800 mètres de profondeur, l'installation accueillera l'ensemble des déchets radioactifs du pays. De son côté, la Belgique a entériné en 2022 le principe d'un stockage en profondeur des déchets radioactifs de haute activité et/ou à vie longue. Depuis plus de quarante ans, l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (Ondraf) et le Centre d'études nucléaires belge (SCK-CEN) conduisent dans le laboratoire souterrain Hades, à Mol (province d'Anvers), des recherches et des expérimentations sur le stockage géologique dans l'argile.

Deux roches pour deux stockages géologiques en Hongrie

La Hongrie envisage de disposer à terme de deux stockages géologiques profonds, implantés dans des contextes rocheux distincts. Le premier existe déjà : le *National Radioactive Waste Repository* (NRWR), situé à Bataapáti, est en exploitation depuis 2012. Il réceptionne les déchets radioactifs de faible et moyenne activité dans un massif granitique. Parallèlement, un projet est à l'étude pour développer un stockage géologique profond en formation argileuse, destiné à accueillir les déchets les plus radioactifs.

La roche granitique en Finlande

Localisée sur l'île d'Olkiluoto, à 430 mètres de profondeur dans le granite, l'installation finlandaise Onkalo est en phase d'essais. L'Autorité de sûreté nucléaire finlandaise (STUK) s'est donné jusqu'au 31 décembre 2025 pour se prononcer sur l'autorisation

de mise en service de ce qui pourrait être le premier stockage géologique de déchets radioactifs de haute activité en service dans le monde. Le concept finlandais vise à placer les combustibles usés des centrales nucléaires dans des conteneurs en fonte, eux-mêmes placés dans des enceintes en cuivre, puis de les disposer dans des alvéoles de stockage creusées dans le granite qui seront ensuite refermées par de la bentonite, une argile gonflante.

Des environnements géologiques variés en Allemagne

Après avoir stocké des déchets de faible et moyenne activité dans d'anciennes mines de sel, le gouvernement a choisi en 2019 le site de l'ancienne mine de fer de Konrad, en Basse-Saxe, pour accueillir ce type de déchets. L'installation devrait être opérationnelle en 2030. L'Allemagne a également relancé en 2013 une recherche de sites pour le stockage de ses déchets de haute activité. En 2020, 90 zones ont été identifiées dans plusieurs formations géologiques : le sel, le granite, mais aussi l'argile.



En savoir plus sur les stockages de déchets radioactifs à travers le monde :
https://urls.fr/pBb1_C



Galerie souterraine du stockage géologique hongrois de Bataapáti.



Un scientifique lors d'une opération de contrôle d'un démonstrateur d'alvéole, creusée dans l'argile, au sein du Laboratoire souterrain.

Une roche modèle pour la recherche géologique

Si l'Andra a acquis une très bonne connaissance des argilites du Callovo-Oxfordien, les expérimentations se poursuivent pour parfaire ce savoir.

S'il est une roche particulièrement étudiée en France, c'est bien le Callovo-Oxfordien. Nombre de scientifiques ont participé aux travaux menés au Laboratoire souterrain de l'Andra. « C'est un lieu privilégié pour les chercheurs, car ils sont au plus près de la roche argileuse et peuvent l'étudier en continu », commente Jean-Charles Robinet, chef de département à la direction scientifique et technique. L'ensemble des travaux menés depuis vingt-cinq ans ont démontré la capacité de confinement de la couche du Callovo-Oxfordien. Elle a en effet une perméabilité très faible, ce qui contraint les éléments radioactifs à se déplacer surtout par diffusion, de façon extrêmement lente. Par ailleurs, les chercheurs ont aussi établi que les argilites retiennent la plupart des éléments radioactifs grâce aux minéraux argileux de la roche, qui les fixent à leur surface. Enfin, ils ont également montré qu'une majorité des radionucléides sont peu

solubles dans l'eau présente naturellement dans la roche. Seuls certains radionucléides, très mobiles et à vie longue, peuvent migrer jusqu'aux limites de la couche argileuse, de manière très étalée dans le temps, sur plusieurs centaines de milliers d'années.

Les expérimentations actuelles

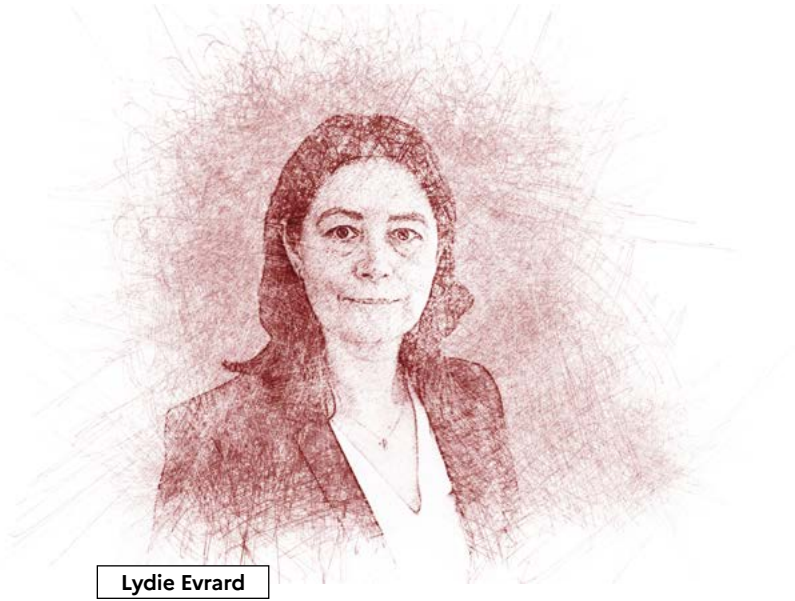
Si de nombreuses connaissances sont déjà acquises, les recherches se poursuivent. « Le Laboratoire souterrain est inscrit dans le temps long, explique Jean-Charles Robinet. Nous poursuivons les expérimentations pour confirmer les acquis sur des échelles plus longues et optimiser la conception de Cigéo. » Les chercheurs de l'Andra travaillent ainsi à la modélisation de la couche argileuse pour évaluer son comportement dans le temps et à l'étude de la pression de l'eau. Ils testent aussi de nouveaux capteurs, avec l'objectif d'un suivi à distance via les ondes propagées

dans la roche. Par ailleurs, des forages ont encore lieu pour préciser la géométrie en 3D de l'argilite : « Il nous faut affiner au maximum cette géométrie pour s'assurer que le tunnelier qui creusera le puits d'accès cible bien le centre de la formation », précise Jean-Charles Robinet. Toujours en matière de construction, des expérimentations sont menées avec de nouveaux matériaux (céramique, béton bas carbone...) pour étudier leurs interactions avec la roche. De nouvelles techniques de creusement sont également à l'essai. « Nous étudions différents usages possibles de l'argile excavée, car elle ne sera pas entièrement utilisée pour remblayer les galeries au moment de la fermeture de Cigéo », annonce Jean-Charles Robinet.

____PORTRAIT____

« L'Andra, une agence de référence, ouverte et engagée »

Lydie Evrard a pris ses fonctions de directrice générale de l'Andra en juin 2025. Elle présente pour le Journal de l'Andra les enjeux à venir pour l'Agence.



Lydie Evrard

L'Andra entre dans une phase charnière de son histoire avec l'avancée de Cigéo. Fruit de plus de trois décennies de recherche et de développement, régulièrement évalué et renforcé par la prise en compte des recommandations ainsi formulées, le projet s'engage dans une nouvelle étape vers sa réalisation. Le dossier d'autorisation de création a fait l'objet d'une instruction technique de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR), et des consultations sont en cours auprès des collectivités territoriales et des parties prenantes. Si le projet est autorisé, la construction de l'installation pourra débuter, ce qui représentera une étape cruciale pour l'Andra et un changement d'échelle qu'il nous faut anticiper d'un point de vue humain et organisationnel. En parallèle, d'autres enjeux importants doivent être traités, appelant des réponses coordonnées et adaptées, en particulier la mise en œuvre d'une solution de gestion sûre et responsable des déchets de faible activité à vie longue, et les enjeux associés aux projets de nouveaux réacteurs en matière de gestion des déchets radioactifs. L'Andra doit aussi veiller au renouvellement des capacités de stockage pour les déchets de très faible activité, notamment avec la mise en œuvre du projet Acaci autorisé en 2024, et préparer le passage en phase de surveillance du Centre de stockage de la Manche. La sûreté et la protection des personnes et de l'environnement à long terme, le travail en étroite collaboration et en toute transparence avec l'ensemble des acteurs seront des

“
Ma double expérience en France et au niveau international me permet d'aborder les défis de l'Andra avec un regard à la fois exigeant et confiant. La réussite des futurs projets requerra un haut niveau de rigueur et de performance, dans toutes ses dimensions. »

éléments indispensables pour la réussite de tous ces projets, comme ils le sont pour les centres aujourd'hui en exploitation. L'ancrage territorial de l'Agence restera au cœur de notre action. L'écoute et un dialogue de qualité avec les élus, les riverains, les parties prenantes et les services de l'État resteront la ligne directrice de l'Agence. La réussite des futurs projets requerra un haut niveau de performance au sens général, incluant rigueur, sûreté, protection de l'environnement, ainsi que maîtrise des coûts et des délais. Notre capacité à consolider notre culture de sûreté, à anticiper les besoins de la filière nucléaire pour proposer des solutions de gestion adaptées, à entretenir les bonnes relations que nous avons avec nos partenaires, en France et dans le monde, ainsi que notre capacité à conserver les talents de l'Agence et à en attirer de nouveaux seront les leviers essentiels de notre réussite collective.

Le CEA, 80 ans au cœur des défis scientifiques et technologiques

Créé en 1945 pour donner à la France la maîtrise de l'atome, le CEA est devenu un acteur clé de la recherche dans l'énergie, la santé, le climat ou le numérique. À l'occasion de ses 80 ans, zoom sur ses grandes avancées et ses projets d'avenir.

Quelles grandes découvertes ont marqué l'histoire du CEA depuis sa création ?
— Cédric Garnier, directeur adjoint de la Communication :
Le CEA a été fondé en 1945 à l'initiative du général de Gaulle pour maîtriser l'énergie atomique dans les domaines de l'énergie et de la défense. Dès 1948, il met au point la première pile atomique française, Zoé. En 1964, la dissuasion nucléaire devient opérationnelle. Le CEA a aussi conçu le premier microprocesseur français en 1967, mené des recherches sur le climat dès les années 1980, créé le premier qubit quantique⁽¹⁾ en 2002, contribué au lancement du projet ITER, et inauguré en 2024 l'IRM la plus puissante au monde. Sa force réside dans sa capacité à croiser les disciplines, ce qui lui vaut de figurer en tête du classement Clarivate des 100 organismes mondiaux les plus innovants.

Quels projets innovants sont aujourd'hui en cours de développement ?
— Héloïse Goutte, directrice scientifique des énergies :
Le CEA développe des solutions pour un mix énergétique neutre en carbone, associant nucléaire et renouvelables. Il conçoit de nouveaux réacteurs adaptés aux besoins industriels, comme les petits réacteurs modulaires hybrides. À Cadarache, le réacteur expérimental Jules Horowitz en cours de construction servira à la fois à la recherche et à la production de radioéléments médicaux. Enfin, le programme de recherche de



Test d'un robot pour l'assainissement-démantèlement au CEA Marcoule.

rupture « Audace! », lancé en 2024 avec plus de 80 partenaires, explore des voies inédites, comme la capture et le recyclage du CO₂ inspirés du vivant.
Comment le CEA innove-t-il dans le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs ?
— Magali Saluden, chef de programme R&D pour l'assainissement et le démantèlement :
Être à la fois organisme de recherche et exploitant nucléaire nous permet de développer et de tester des technologies en conditions réelles. Aujourd'hui, trois axes structurent notre R&D : la caractérisation des déchets en milieu contraints via des systèmes mobiles, leur conditionnement et la décontamination optimisée des installations. Nous visons aussi à recycler davantage les matériaux faiblement activés et à réduire l'empreinte carbone de nos procédés. ●

IL ÉTAIT UNE FOIS L'ANDRA...
L'Andra a été créée en 1979 au sein du CEA. Sa mission : gérer les déchets radioactifs produits en France. Elle reprend alors l'exploitation du Centre de stockage de la Manche, premier centre de stockage de déchets radioactifs, en service en France depuis 1969, et commence à travailler sur le stockage géologique des déchets les plus radioactifs. Par la loi du 30 décembre 1991, l'Andra devient un établissement public indépendant des producteurs de déchets radioactifs.

(1) « Quantum bit », ou « bit quantique ». Le bit est l'unité de base de l'information dans un ordinateur. Tandis qu'un bit classique peut prendre deux états (0 ou 1), le qubit peut être à la fois 0 et 1 en même temps grâce aux lois de la physique quantique, ce qui ouvre la voie à des calculs beaucoup plus puissants pour certaines tâches.

Cigéo : un démonstrateur pleine échelle pour confirmer l'étanchéité des hottes de transfert et des façades MA-VL

En Haute-Marne, l'Andra a mis au point un nouveau démonstrateur pour le projet Cigéo. L'objectif ? Vérifier l'étanchéité des dispositifs destinés au stockage souterrain des colis de déchets radioactifs de moyenne activité et à vie longue (MA-VL). Les premiers tests, à température ambiante, se sont révélés concluants.

Dans Cigéo, les déchets radioactifs seront acheminés via un funiculaire jusqu'à la zone souterraine de stockage, à 500 mètres de profondeur. Cette zone est divisée en deux quartiers, dont l'un sera consacré aux déchets radioactifs de moyenne activité et à vie longue (MA-VL).

Pour y accéder depuis la surface, les colis de déchets radioactifs seront placés dans une hotte de transfert pouvant atteindre les 85 tonnes. Cette dernière assure aux colis une protection contre les agressions extérieures (chocs, incendie...) et une protection radiologique du personnel qui pourrait se trouver à proximité. Une fois en zone souterraine, des navettes

automatisées transporteront la hotte jusqu'aux alvéoles de stockage. À l'entrée de l'alvéole, le déchargement de la hotte de transfert vers l'intérieur de l'alvéole de stockage s'effectuera au moyen d'une façade d'accostage.

Un dispositif au cœur de la sûreté

Ce transfert des colis est une étape cruciale et il doit être réalisé avec le niveau d'étanchéité requis. Pour tester cette étanchéité, l'Andra a fait construire et teste une hotte de transfert de colis de déchets MA-VL ainsi qu'un modèle de façade d'accostage disposé à l'entrée des alvéoles de stockage. Ce démonstrateur a été conçu à échelle réelle afin de réaliser

des essais de performance d'étanchéité au plus proche de la réalité. « Garantir l'étanchéité de l'air entre les galeries de liaison et les hottes ou les alvéoles de stockage est primordial », insiste Sébastien Le Merrer, ingénieur en procédé mécanique à l'Andra.

Une fois placée devant l'entrée d'une alvéole de stockage, la hotte de transport est plaquée contre la façade d'accostage. Les portes de la hotte et de la façade s'ouvrent alors simultanément, grâce à une impulsion mécanique.

Pour maintenir le confinement lors du processus de transfert des colis de déchets radioactifs, la hotte et la façade d'accostage sont équipées de joints : un joint interne à la hotte entre la porte et l'enceinte de confinement, et trois joints sur la façade, qui se gonflent automatiquement pour assurer l'étanchéité. Des capteurs complètent le dispositif afin d'assurer la bonne réalisation des essais.

Des résultats prometteurs

Afin de valider les performances de confinement, de nombreux essais en conditions normales ont été réalisés. Différentes positions en cohérence avec les tolérances de positionnement de la hotte

par rapport à la façade d'accostage ont été testées, ainsi que la résistance à l'usure avec 500 cycles d'ouverture et de fermeture.

Le démonstrateur respecte le concept décrit dans la demande d'autorisation de création (DAC) de Cigéo. Il est représentatif du processus de stockage des colis MA-VL, et sa maquette a été conçue en prenant en compte les critères les plus stricts. « Nous avons testé l'étanchéité en nous basant sur les dimensions de la hotte [voir encadré] qui comporte le plus grand linéaire de joint. Les résultats des tests sont prometteurs, avec des marges significatives en conditions normales », souligne Sébastien Le Merrer.

Dans les mois à venir, des essais simulant un incendie seront réalisés pour vérifier l'étanchéité en conditions accidentelles.

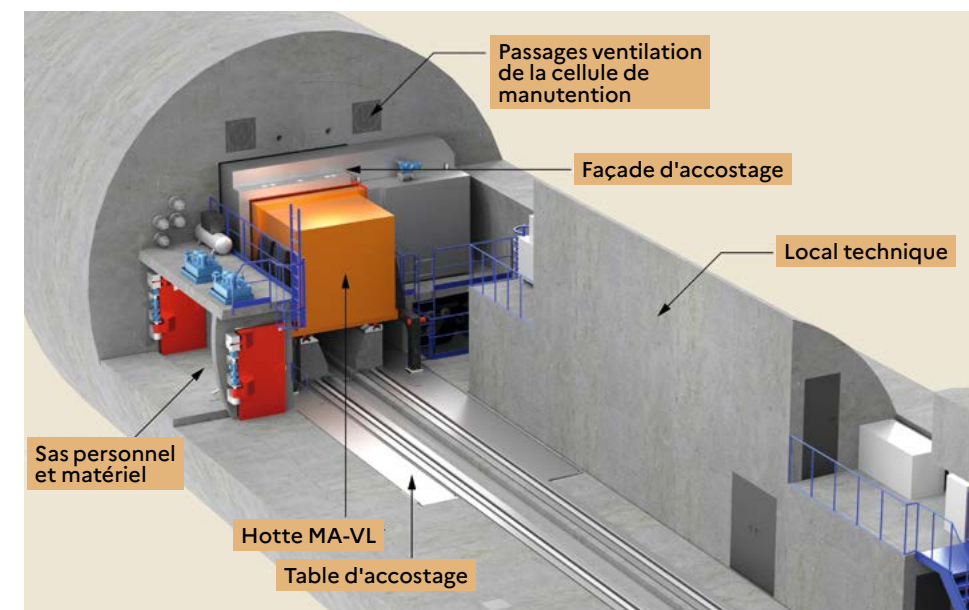
Les résultats des essais réalisés en conditions normales renforcent la confiance dans la capacité du système à maîtriser le confinement des zones de stockage et confirment les principes de conception soumis dans la DAC. L'analyse complète des essais technologiques permettra de monter en maturité les composants testés dans les futures phases de développement de la hotte et de la façade d'accostage MA-VL. ●



Le démonstrateur testé reproduit les éléments essentiels de la hotte de transfert des colis et de la façade d'accostage MA-VL. Ils sont conçus pour garantir l'étanchéité des équipements lors du transfert des colis de déchets radioactifs vers leurs alvéoles de stockage.

LE DÉMONSTRATEUR EN CHIFFRES

- 5 m de large, 6 m de long et 3,6 m de haut
- 12 m de longueur pour le joint le plus long
- 13 tonnes d'acier pour la porte de la hotte
- 19 tonnes d'acier pour la porte de la façade
- 500 cycles d'ouverture et de fermeture pour tester la résistance à la fatigue des joints
- Niveau d'étanchéité de la hotte seule 20 fois supérieur au minimum attendu
- 1000 °C : c'est la température à laquelle les équipes de l'Andra vont tester la résistance des joints en conditions d'incendie



LE SAVIEZ-VOUS ?



Les colis MA-VL sont répartis, selon leur forme et leur volume, dans trois types de hottes de transfert. Afin de couvrir les critères les plus contraignants, la hotte fabriquée pour le démonstrateur a été dimensionnée de manière à représenter le cas le plus exigeant parmi les trois modèles. Concernant la porte, les ingénieurs se sont basés sur les dimensions de celle comportant le plus grand linéaire de joint.



Découvrir le démonstrateur en vidéo : <https://urls.fr/vBznJv>



Sous-marins nucléaires : des producteurs de déchets « ordinaires » !

Fin 2024, après trente-sept ans de service actif, le sous-marin nucléaire d'attaque Émeraude a entamé son dernier voyage avant son désarmement. Au cours de toutes ces années de fonctionnement, il a produit, comme toute installation nucléaire, des déchets radioactifs. Ces déchets de la Défense nationale sont pris en charge par l'Andra, au même titre que ceux des hôpitaux, des laboratoires de recherche ou encore des industries qui utilisent les propriétés de la radioactivité. Ils sont donc soumis aux mêmes obligations pour être stockés en toute sécurité. Explications.

Indétectables, mystérieux : les sous-marins nucléaires nourrissent les fantasmes. Mais du point de vue de l'Andra, ils ne diffèrent en rien des autres installations nucléaires « civiles », à savoir qu'ils produisent des déchets radioactifs tout au long de leur exploitation, puis lors de leur démantèlement. « 85% des colis de déchets radioactifs provenant de sous-marins nucléaires que nous recevons sur nos centres de stockage dans l'Aube, le CSA⁽¹⁾ et le Cires⁽²⁾, sont le produit d'opérations de maintenance au cours

de l'exploitation : gants, chiffonnettes, vinyles, petits outils... Les 15% restants proviennent d'opérations de démantèlement en fin de vie : pièces métalliques, éléments de chaufferie ou de circuit primaire⁽³⁾ », confirme Bastien Planel, ingénieur approbations faible et moyenne activité (FMA), qui étudie les demandes de prise en charge de ces déchets à l'Andra. Dans les deux cas, les déchets sont orientés en fonction de leur niveau de radioactivité et de leur durée de vie : l'Andra

accueille ainsi les déchets très faible activité (TFA) au Cires, tandis que ceux de faible à moyenne activité principalement à vie courte (FMA-VC) sont destinés au CSA.

Un processus rigoureux
En tant que maître d'ouvrage délégué des programmes de chaufferies nucléaires en France⁽⁴⁾, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) passe régulièrement des commandes à de grands industriels pour la construction de nouvelles chaufferies⁽⁵⁾. Il s'appuie sur l'expertise technique du Service technique mixte des chaufferies nucléaires de propulsion navale (STXN), qui regroupe du personnel civil ou militaire du ministère des Armées et du CEA. Le STXN est l'interlocuteur de l'Andra pour tout ce qui relève de la prise en charge des déchets radioactifs. Il doit informer l'Agence sur la nature exacte des colis et des déchets qu'il lui adresse : quantité, volume, composition physico-chimique et radiologique, types d'emballage, etc. Leur expédition puis leur

réception sur les sites de stockage de l'Andra sont toujours soumises à l'approbation de l'Agence. Des réunions mensuelles entre le STXN et l'Andra permettent d'anticiper ces opérations et d'optimiser le remplissage des ouvrages et des alvéoles de stockage.

Prise en charge sur les centres de l'Andra dans l'Aube
Les volumes concernés annuellement sont faibles : environ 200 « big bags⁽⁶⁾ » de déchets TFA pour le Cires, 40 fûts à compacter et quatre caissons à injecter de déchets FMA-VC pour le CSA. « Cela représente 0,4% des 55 000 colis que reçoit l'Andra chaque année, calcule Bastien Planel. Pour nous, il s'agit d'un petit producteur de déchets radioactifs. » À l'arrivée des camions, l'Andra vérifie l'état des colis et effectue des contrôles radiologiques. Des prélèvements peuvent également être effectués pour s'assurer que les déchets sont bien conformes à ce qui a été déclaré et validé. « Nous faisons exactement la même chose que pour le

nucléaire civil : le processus, les documents, les contrôles, les normes sont identiques », précise Bastien Planel. ●

(1) Centre de stockage de l'Aube.
(2) Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage.
(3) Circuit fermé assurant la transmission de la chaleur dégagée dans le cœur du réacteur vers les générateurs de vapeur, qui transforment cette chaleur en vapeur.
(4) Conformément à « l'Œuvre Commune », qui définit notamment le périmètre des missions entre le ministère des Armées et le CEA.
(5) Au sein de la Direction des applications militaires (DAM), où ces programmes sont pilotés par la Direction de la propulsion nucléaire (DPN).
(6) Grands sacs souples servant au conditionnement et au transport de déchets radioactifs de très faible activité.

SOUS-MARINS NUCLÉAIRES FRANÇAIS : ÉTAT DES LIEUX

Les forces sous-marines françaises disposent aujourd'hui de quatre sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE) dotés d'un armement mettant en œuvre des missiles équipés de têtes nucléaires, et de six sous-marins nucléaires d'attaque (SNA) à l'armement conventionnel.

Les premiers SNLE, de la génération du Redoutable, inauguré en 1967 et aujourd'hui exposé à la Cité de la Mer à Cherbourg-en-Cotentin, sont tous en phase de démantèlement et de déconstruction. Ils ont été remplacés par une nouvelle génération de SNLE, de type Le Triomphant, mis en service en 1997.

Les SNA de première génération, de classe Rubis (mis en service en 1983), sont progressivement désarmés pour laisser la place aux SNA de deuxième génération, de type Suffren, dont le premier bâtiment a été admis au service actif en juin 2022.



Sous-marin nucléaire Le Redoutable, exposé à la Cité de la Mer à Cherbourg.



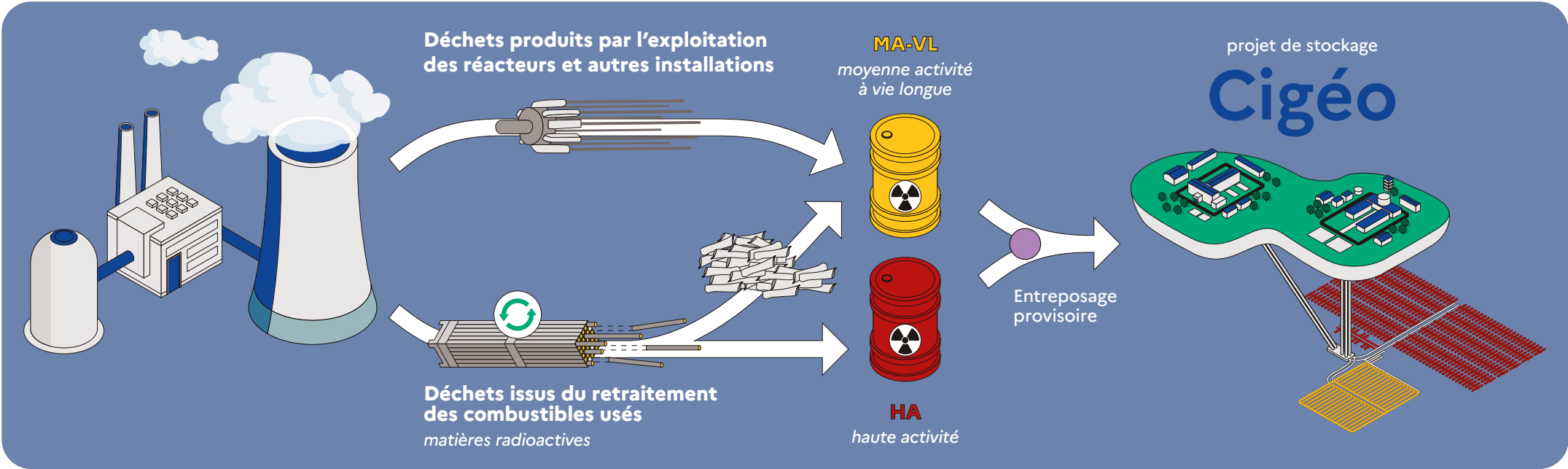
Sous-marin Le Redoutable en cours de démantèlement (découpe de la tranche réacteur).



Le sous-marin nucléaire Saphir de retour à la base.

Les inventaires de Cigéo

Cigéo a pour objectif de mettre en sécurité les déchets radioactifs les plus dangereux. Plus de 50% de ces déchets sont déjà produits. Si ces déchets et ceux à venir sont identifiés dans un inventaire de référence qui sert de base à la conception du centre, Cigéo doit aussi démontrer sa capacité à s'adapter à de potentielles évolutions qui pourraient survenir dans le futur. Pour cela, le projet présente deux inventaires distincts. Explications.



INVENTAIRE DE RÉFÉRENCE

INSTALLATIONS EN EXPLOITATION OU ARRÊTÉES	INSTALLATIONS EN CONSTRUCTION OU EN MISE EN SERVICE
 58 réacteurs REP (+ 9 UNGG et 3 prototypes) moyenne 50 ans*	 EPR de Flamanville
 Usines du cycle du combustible nucléaire	 Réacteur expérimental Jules Horowitz
 Centres de recherche	 ITER *20 ans

Les déchets qui doivent être stockés dans Cigéo sont répertoriés dans l'**Inventaire de référence**.

Cet Inventaire de référence a servi de donnée d'entrée pour concevoir et dimensionner Cigéo tel que présenté dans le dossier de demande d'autorisation de création déposé en janvier 2023.

Il prend en compte les déchets issus des installations nucléaires existantes ou déjà autorisées en 2016 et fonctionnant une cinquantaine d'années.

- Il répertorie 83000 m³ de déchets :
- 73000 m³ de déchets de moyenne activité à vie longue,
 - 10000 m³ de déchets de haute activité.



INVENTAIRE DE RÉSERVE

quels types de déchets ?

possibilité de stockage dans Cigéo ?

Cigéo sera exploité pendant plus de cent ans, durée pendant laquelle, par exemple, la politique énergétique française peut évoluer. Plusieurs scénarios d'évolution ont été étudiés. Pour les prendre en compte, un inventaire complémentaire a été établi. C'est l'**Inventaire de réserve**.



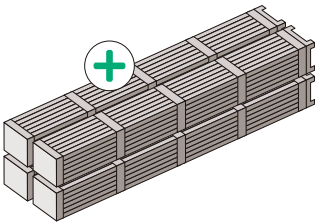
Le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo intègre un volet adaptabilité qui présente les évolutions de conception nécessaires si Cigéo devait prendre en charge les déchets de l'**Inventaire de réserve**.

Les études de l'Andra consistent à regarder si Cigéo est en capacité de pouvoir accueillir ces déchets supplémentaires ou différents avec le même niveau de sûreté. Leur stockage dans Cigéo reste soumis à une autorisation de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection.

Scénarios pris en compte pour l'Inventaire de réserve

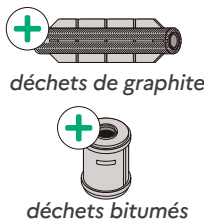
1/ ARRÊT DU RECYCLAGE DES COMBUSTIBLES USÉS

Si la France arrêta de recycler le combustible usé des centrales nucléaires, les assemblages entiers devraient être stockés directement dans Cigéo.

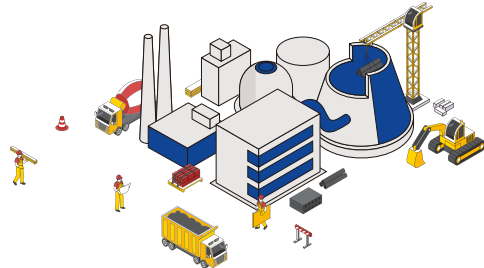


2/ STOCKAGE DES DÉCHETS FA-VL

Les options de gestion sont encore en réflexion pour les déchets de faible activité à vie longue. L'Andra doit étudier la prise en compte d'une partie d'entre eux dans Cigéo.



3/ PROLONGATION DE LA DURÉE DE VIE DES CENTRALES ET NOUVEAUX RÉACTEURS



Les déchets HA et MA-VL issus du déploiement de six réacteurs EPR2 et la prolongation de dix ans du fonctionnement des réacteurs nucléaires existants sont aussi intégrés à l'**Inventaire de réserve**.





Gestion des déchets radioactifs au Canada : les projets de stockage progressent

Le Canada structure progressivement la gestion à long terme de ses déchets radioactifs et vient de franchir plusieurs étapes clés.

L'exploitation des mines d'uranium, ainsi que la recherche et le développement des technologies nucléaires font partie de longue date de l'histoire du Canada. Depuis le début des années 1960, le pays utilise l'énergie nucléaire pour la production d'électricité. Aujourd'hui, quatre centrales situées dans l'Ontario et au Nouveau-Brunswick abritent 17 réacteurs nucléaires en fonctionnement. L'ensemble de ces activités produit des déchets radioactifs, classés en quatre catégories. Les deux premières (déchets

de faible activité et déchets de moyenne activité) concernent essentiellement le fonctionnement des réacteurs nucléaires. Les déchets de haute activité sont constitués principalement de combustible nucléaire usé⁽¹⁾. Enfin, les déchets issus des mines et des usines de concentration d'uranium forment la quatrième catégorie.

2024 : une année charnière
À l'heure actuelle, seuls des entreposages temporaires permettent de gérer les déchets radioactifs. Mais le pays travaille sur des solutions pérennes. À

Chalk River, au nord-ouest d'Ottawa, un premier projet de stockage en subsurface porté par les Laboratoires nucléaires canadiens (LNC) cible les déchets de faible activité (équipements de protection individuelle, matériaux de construction contaminés, etc.). La plupart proviendront des activités de recherche du site LNC à Chalk River. En janvier 2024, la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) a donné son feu vert pour la construction de l'installation. Un autre projet, piloté par la Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN), concerne le stockage géologique profond des combustibles nucléaires usés. À l'issue des études d'impact environnemental et de sûreté, ainsi que d'un processus de sélection et de concertation, une formation rocheuse dans le nord-ouest de l'Ontario a été retenue en novembre 2024. Sous réserve des autorisations nécessaires, la construction du stockage pourrait commencer vers 2033 et le démarrage de l'exploitation au début des années 2040. ●

(1) Qui n'est pas retraité au Canada, contrairement à la France.



Robotique autonome : l'Andra et les industriels exposent leurs avancées

En juin dernier, l'Andra a présenté à la presse plusieurs spécimens de robots, dont SAM et Cigéfix, développés pour les besoins du projet Cigéo. L'occasion de mettre en lumière les progrès accomplis en matière de robotique et d'intelligence artificielle par les industriels confrontés aux mêmes problématiques que l'Agence.



L'événement, organisé le 12 juin dernier au Centre de l'Andra en Meuse/Haute-Marne, a rassemblé des journalistes de presse locale et spécialisée, ainsi que des partenaires institutionnels et industriels de l'Andra. Tous ont pu découvrir les performances de robots conçus par des industriels pour évoluer dans des espaces contraints et souterrains. Leurs noms ? ANYmal (École des mines/CNRS/Université de Lorraine), Perceval (RATP), Amorac (Framatome), Argos (Naval Group), et bien sûr SAM et Cigéfix (Andra). « Réunir autant de robots en un seul événement nous a semblé pertinent, car la robotique et l'intelligence artificielle répondent à des problématiques complexes comme celles que nous rencontrons avec le projet Cigéo, et nous échangeons beaucoup avec d'autres industriels pour partager nos expériences », explique

Julien Cotton, chef du service Chaîne de données et Digital à l'Andra.

Démonstrations sur le terrain

À 490 mètres sous terre, dans les galeries du Laboratoire souterrain de l'Andra, chaque robot a démontré ses performances. « Perceval, mis au point par la RATP, est déjà opérationnel pour contrôler les infrastructures. Mais la plupart des projets, comme le nôtre, sont en phase de R&D », indique Julien Cotton. L'enjeu commun à tous étant de renforcer l'autonomie de ces robots appelés à arpenter des espaces souterrains. Ainsi, Cigéfix (ou ses successeurs) pourrait évoluer dans les galeries de Cigéo pour les scanner en 3D, mais aussi effectuer différents contrôles et des mesures. « Il faut lui apprendre à contourner les obstacles, à interpréter la signalétique des

galeries pour pouvoir s'orienter, à analyser les bruits lorsqu'un autre engin arrive, etc. Nous ne sommes qu'au début du chemin, même s'il a déjà beaucoup progressé », conclut Guillaume Hermand, ingénieur instrumentation et robotique à l'Andra. ●

BRIQUES TECHNOLOGIQUES

Dans sa démarche de R&D, l'Andra avance par étapes en utilisant différents outils de la robotique mobile autonome : capteurs, caméras, radars, lidars, intelligence artificielle, traitement de données en temps réel, etc. Ces technologies sont ensuite embarquées sur des robots, qu'ils soient quadrupèdes comme Cigéfix ou sur chenilles comme SAM.

#ON VOUS RÉPOND

Peut-on visiter les installations de l'Andra ?

Oui, et toute l'année ! Particuliers, enseignants, associations, collectivités, professionnels... chacun peut découvrir les coulisses du stockage des déchets radioactifs sur simple demande. Et pour aller encore plus loin, des journées portes ouvertes sont organisées une fois par an. Le Centre de Meuse/Haute-Marne propose plusieurs formats de visites. Le week-end, des visites guidées gratuites

sans réservation permettent d'explorer l'exposition permanente « Dessus/Dessous » consacrée à Cigéo et de découvrir des prototypes de conteneurs de déchets et des robots conçus pour le projet. En semaine, nous invitons le public à prendre contact au 03 29 75 53 73, du lundi au vendredi, ou par mail à : visite.55.52@andra.fr. Soixante kilomètres plus à l'ouest, dans le département de l'Aube, le Centre de stockage de l'Aube (CSA) et le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires), seuls sites de stockage de déchets radioactifs en exploitation en France, accueillent gratuitement le public sur réservation pour des visites guidées. Une occasion unique de découvrir comment ces déchets sont gérés et d'assister en direct à leur réception, aux contrôles et à leur stockage. Enfin, dans le Cotentin, le Centre de stockage de la Manche (CSM) a été le premier centre français de stockage de déchets radioactifs. Il est aujourd'hui en phase de fermeture. Sa visite guidée, gratuite et sur réservation, commence par une présentation des missions de l'Andra, puis se poursuit à la découverte du site et des installations de contrôle de l'environnement.



Plus d'infos : <https://urls.fr/rZtFBw>



#ILS SONT VENUS NOUS VOIR



Des représentants des agences de communication Cimaya et Kzoar se sont récemment rendus au Laboratoire souterrain de l'Andra pour une visite des installations.

« Plonger à 500 mètres sous terre a été une expérience inédite, à la hauteur des enjeux que porte ce projet hors norme. Nous avons découvert un site unique pensé pour répondre aux défis majeurs de la gestion des déchets radioactifs. Une opportunité précieuse, au cœur de l'excellence scientifique et technique au service de l'intérêt général. Merci aux équipes de l'Andra ! »



Vous aussi, vous souhaitez mieux comprendre la gestion des déchets radioactifs ? Contactez le service Communication au 03 29 75 53 73 ou par mail à visite.55.52@andra.fr

PHOTOMYSTÈRE



Que représente cette photo ?

Il s'agit de voussoirs (éléments préfabriqués en béton assurant le soutènement des galeries) équipés de capteurs au Laboratoire souterrain de l'Andra. Chaque voussoir pèse environ 2 tonnes.

Le Laboratoire souterrain se visite aussi depuis votre canapé !



Pour accéder à la visite
virtuelle :
<https://lc.cx/vYIMxk>

