



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



PRINTEMPS-ÉTÉ 2024 N° 48

le Journal de l'Andra

— ÉDITION MEUSE/HAUTE-MARNE

P.12

**Radioactivité
et radioprotection :**
les rayonnements
sous contrôle



Sommaire

en bref

- P.4** Nouvel accord de partenariat entre le BRGM et l'Andra
- P.4 danslesmédi**as
L'incroyable destin de Marie Curie
- P.5** Retour sur la semaine des métiers du nucléaire
- P.5** La campagne d'alternance de l'Andra bat son plein

tableau de bord

- P.6** Les alvéoles HA au Laboratoire souterrain

territoire

- P.7** Mieux connaître l'environnement : de nouveaux travaux en projet pour Cigéo
- P.8** DESSUS/DESSOUS : un avant-goût de Cigéo
- P.10** Phase industrielle pilote de Cigéo : les attentes de la société civile
- P.11** Entreposage des déchets les plus radioactifs : dans les coulisses du site Orano La Hague



dossier



P.12 Dossier

Radioactivité et radioprotection : les rayonnements sous contrôle

- P.13** La radioactivité, invisible... et omniprésente !
- P.13** Les unités de mesure de la radioactivité
- P.14** Radioactivité : quelle exposition pour quels effets ?
- P.14** Les dates clés de la radioprotection
- P.16** Radioprotection : se protéger des radiations
- P.17** Dans les coulisses des centres industriels de l'Andra
- P.19** Bientôt un indicateur de la nocivité des déchets radioactifs ?

portrait

- P.20** Michaël Fauquet : l'étude des impacts environnementaux

l'invité

- P.21** Entretien avec Dominique Le Guludec, nouvelle présidente du Comité éthique et société

reportage

- P.22** Les robots de l'extrême : au cœur d'une alvéole de stockage de Cigéo

décryptage

- P.24** Relance du nucléaire : quels impacts sur la gestion des déchets radioactifs ?
- P.26** Terres « Bayard », l'heure du dernier voyage
- P.28** Gestion des déchets radioactifs : l'Espagne affine ses choix

innovation

- P.29** Cigéfix, un chien-robot en quête d'autonomie

entre nous

- P.30** #On vous répond
- P.30** #Ils sont venus nous voir
- P.31** Photomystère

LE POINT DE VUE DE CHEREAU Éclairage scientifique



Les dangers que peut présenter la radioactivité sont aujourd'hui bien connus. Mais cela n'a pas toujours été le cas ! Revivez en pages 26-27 l'histoire de la société Réveils Bayard, l'un des fleurons français de l'horlogerie du xx^e siècle qui utilisait de la peinture au radium. Des terres contaminées provenant de son ancienne usine en Normandie sont aujourd'hui prises en charge sur les centres de l'Andra dans l'Aube. Découvrez également en page 12 notre dossier consacré à la radioprotection.

le Journal de l'Andra Édition Meuse/Haute-Marne N°48
Centre de Meuse/Haute-Marne
CMHM RD 960 - BP9 - 55290 - Tél. : 03 29 75 89 60 - journal-andra@andra.fr

Directeur de la publication : Pierre-Marie Abadie • Directeur de la rédaction : Antoine Billat • Rédacteur en chef : Damien Maury-Tarriet
• Ont participé à la rédaction : Guillaume Tixier, Alexia Attali, Yann Cabaret, Olivier Constant, Valérie Lachenaud, Isabelle de Buyer •
Responsable iconographie : Sophie Muzerelle • Crédits photos : AdobeStock, Andra, Andra / Juliane Patris, Andra / Studio Montclair,
CEA Andrien Daste, Philippe Demali, DR, Enrressa, Gettyimages, Jean-Marie Hurot, Stéphane Lavoué, Philippe Masson, Orano, Studio Durey,
Studio Lavoué • Dessins : Antoine Chereau • Infographies et illustrations : Citizen Press • Conception et réalisation : Citizen Press, Paris :
www.citizen-press.fr • Impression : BLG Toul - Siret 43761704600044 - Imprimé sur du papier issu de forêts durablement
gérées dans une imprimerie certifiée Imprim'vert • © Andra - 371-48 • DDP/DICOM/24-0021 • ISSN 2106-8291 (imprimé),
ISSN 3037-0256 (en ligne) • Tirage : 194 546 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).

1,6 million

C'est le nombre de vues de la vidéo *Lettre aux générations futures* réalisée par l'Andra dans le cadre de sa campagne institutionnelle en 2023. Elle met en scène des salariés de l'Agence qui s'adressent à ceux qui ne sont pas encore nés, témoignent de leur engagement et donnent à tous un message de confiance en l'avenir.

À revoir sur : <https://vu.fr/SMMOG>



Parution des rapports d'information 2023

La dernière édition des rapports d'information du Centre de stockage de l'Aube (CSA), du Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) et du Centre de stockage de la Manche (CSM) vient de paraître. Ces documents grand public présentent notamment les données en matière de radioprotection, de sûreté, de sécurité et les résultats des analyses menées sur l'environnement pour l'année 2023. Disponibles sur : meusehautemarne.andra.fr (rubrique « Ressources »), ou par voie postale sur demande à dialogue@andra.fr.

Erratum

Une erreur de code couleur s'est glissée dans les légendes des graphiques en page 16 du Journal de l'Andra n° 47. Dans le premier schéma, les couleurs des secteurs d'activité « Recherche » et « Médical » ont été interverties, ainsi que celles des secteurs « Défense » et « Industrie non électronucléaire ». Idem pour les couleurs des catégories FMA-VC et TFA dans le second schéma. L'ensemble des chiffres restent exacts. Merci aux lecteurs attentifs qui nous ont signalé cette erreur.

Nouvel accord de partenariat entre le BRGM et l'Andra

En février dernier, l'Andra et le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) ont renouvelé leur partenariat de R&D pour cinq ans. L'accord porte sur plusieurs axes majeurs : la géologie, la géodynamique et l'hydrogéologie afin d'améliorer la connaissance du milieu géologique de Cigéo ; la simulation numérique haute performance pour vérifier que le comportement et l'évolution du stockage sont cohérents avec ce qui est attendu ; le jumeau numérique, le traitement de données et l'intelligence artificielle en vue d'optimiser la

surveillance et l'observation de systèmes complexes comme le stockage et son environnement géologique ; la géochimie des eaux des formations géologiques et des matériaux utilisés pour le stockage, par exemple l'argile pour la réalisation de scellements dans Cigéo. ●



Signature du partenariat entre les directeurs du BRGM et de l'Andra.

dans les médias

L'incroyable destin de Marie Curie

Si le nom de Marie Curie est bien connu du grand public, la richesse de sa vie demeure largement insoupçonnée. Une vidéo récemment publiée sur la chaîne de vulgarisation scientifique « Antoine vs Science » (YouTube) met en lumière ce destin exceptionnel, en mêlant explications scientifiques, documents d'archives et photos anciennes. Un support pédagogique accessible à tous, qui permet d'en apprendre davantage sur la femme qu'était Marie Curie, mais également sur la radioactivité en général et sur l'une des missions de service public de l'Andra : l'enlèvement gratuit des objets radioactifs et l'assainissement des sites anciens pollués par la radioactivité. La vidéo rappelle ainsi que l'Agence collecte chaque année une centaine d'objets radioactifs datant de la période des « années folles » du radium, retrouvés par des particuliers, généralement à la suite d'un héritage. ●



Marie Curie accompagnée de deux scientifiques à Pittsburgh, lors de sa visite aux États-Unis en 1921.

Pour visionner la vidéo : <https://vu.fr/TWcFk>



Retour sur la semaine des métiers du nucléaire

Mardi 6 février 2024, l'Andra organisait sur son Centre de Meuse/Haute-Marne une journée dédiée aux métiers du nucléaire. Une rencontre associant de nombreux partenaires, qui s'inscrivait

dans le cadre de la semaine des métiers du nucléaire, organisée par France Travail (anciennement Pôle Emploi) et l'Université des métiers du nucléaire, du 5 au 9 février.

Consulter les offres d'emploi de l'Andra : <https://vu.fr/hZrCm>



La campagne d'alternance de l'Andra bat son plein

Lancée au printemps, la campagne d'alternance est en cours pour recruter la promotion qui démarrera au second semestre 2024. Il est donc encore temps de postuler pour bénéficier de ce programme très formateur ! Au Centre de Meuse/Haute-Marne ou dans l'un de ses autres sites, l'Andra accueille en effet chaque année une dizaine d'alternants aux profils variés. Qu'ils préparent un Bac+2 ou un Bac+5, ils ont tous en commun de partager leur temps durant un, deux ou trois ans entre leurs missions à l'Andra et leur centre de formation. En associant ainsi théorie et pratique, ces jeunes préparent activement leur entrée dans le monde du travail et se créent un premier réseau professionnel. Consciente de l'intérêt de l'alternance, l'Andra s'est engagée de longue date dans cette démarche et propose des opportunités dans différents métiers : électrotechnique, communication, environnement, sûreté, ingénierie,



etc. Chaque alternant est encadré par un tuteur volontaire pour cette mission et formé pour tenir ce rôle. Référent de l'alternant, il l'accompagne, le responsabilise et assure le lien avec le centre de formation, l'objectif premier étant de transmettre des compétences clés, qui pourront être exploitées dans leur futur cadre professionnel. Pour postuler, il suffit de se connecter sur le site dédié (voir le QR code) et de répondre aux offres disponibles... ou d'envoyer une candidature spontanée ! ●

Découvrez le portrait de Yohann, chargé d'affaires en alternance : <https://vu.fr/YQzQd>

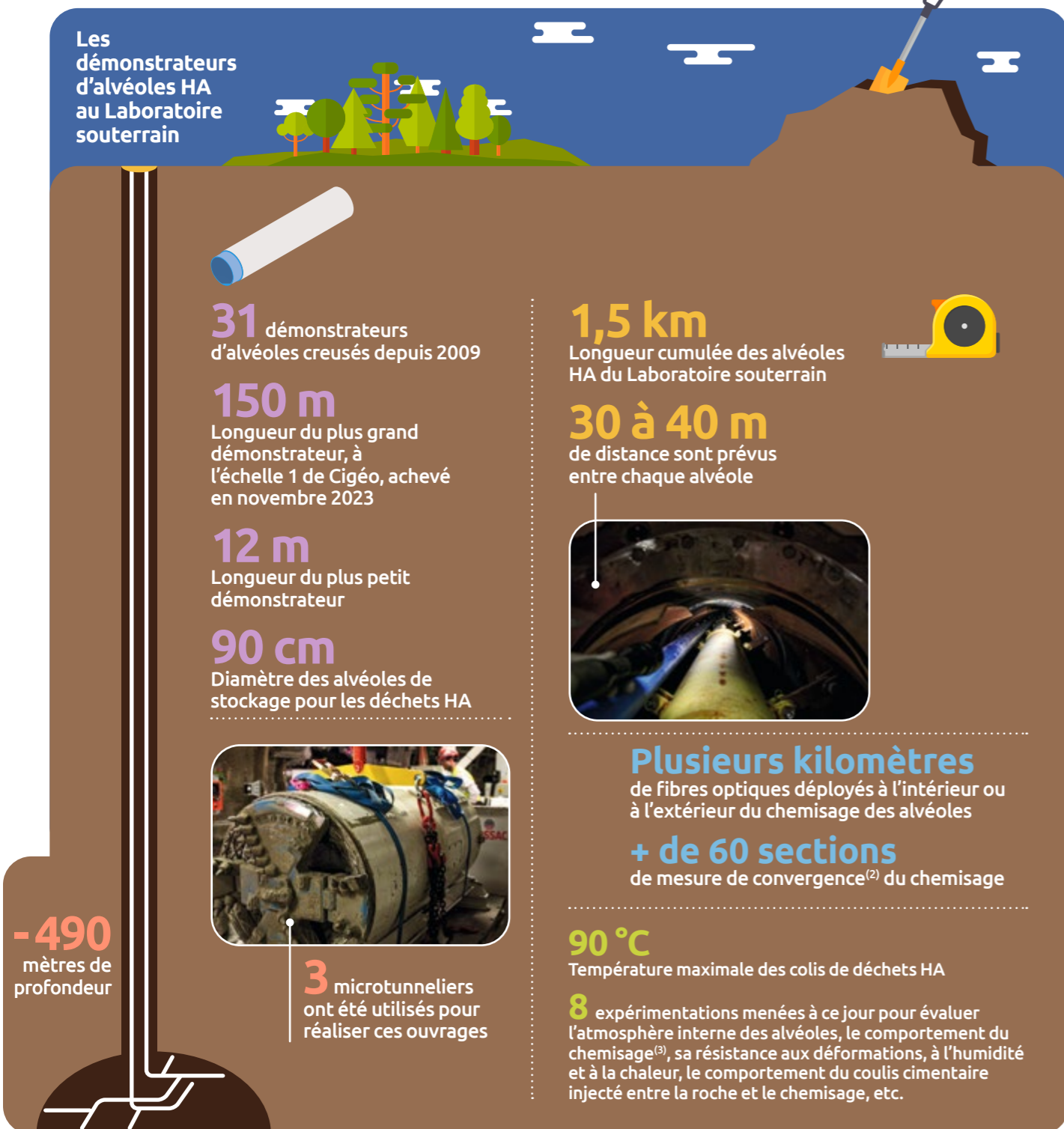


Postulez sur talent-soft : <https://vu.fr/tKOuS>



Les alvéoles HA au Laboratoire souterrain

Les déchets de haute activité (HA) pris en charge dans Cigéo seront stockés dans des alvéoles spécifiques, dont le diamètre et l'espacement sont prévus pour préserver la roche d'une hausse de température⁽¹⁾. Depuis 2009, l'Andra expérimente dans son Laboratoire souterrain en Meuse/ Haute-Marne la réalisation de ces ouvrages de stockage en creusant différents types de microtunnels. Ces démonstrateurs ont permis d'acquérir un maximum de connaissances sur les méthodes de conception des alvéoles HA et leur comportement. Quelques chiffres clés.



(1) Les colis de déchets HA se caractérisent par un dégagement de chaleur qui peut notamment altérer les qualités de la couche d'argile dans laquelle sera implantée Cigéo.

(2) Après le creusement, les galeries ont tendance à se refermer, on dit qu'elles « convergent ».

(3) Tubage métallique destiné à faciliter l'insertion des colis et leur éventuel retrait.

Mieux connaître l'environnement : de nouveaux travaux en projet pour Cigéo

Ce printemps 2024, l'Andra a déposé, auprès des préfetures de la Meuse et de la Haute-Marne et d'une quarantaine de communes concernées, les dossiers de demande d'autorisations visant à réaliser de premiers travaux préparatoires pour Cigéo. Explications.

Reconnaissance archéologique, forages, sondages des sols... Ces travaux ont pour but d'apporter des précisions et d'approfondir la connaissance de l'environnement du point de vue géologique, hydrogéologique (étude des eaux souterraines) et géotechnique (étude des sols). Ils consisteront à réaliser notamment des forages de reconnaissance de plusieurs mètres de profondeur, ou à installer des « piézomètres », de petits forages qui permettent de comprendre la circulation des eaux souterraines. Les résultats obtenus lors de cette nouvelle campagne d'investigations permettront d'alimenter de futurs dossiers de l'Andra. Ces travaux intègrent également un aspect « patrimoine » avec la réalisation de nouveaux diagnostics et fouilles archéologiques sur une soixantaine d'hectares, dans la continuité de ceux réalisés en 2016.

Une enquête publique en 2025

Les dossiers préparés par l'Andra comprennent, selon la nature des opérations, une demande d'autorisation environnementale (DAE) et des demandes d'autorisation d'urbanisme (permis de construire et déclarations préalables). L'instruction des services de l'État va durer plusieurs mois. Les collectivités territoriales et l'Autorité environnementale (AE) seront amenées à remettre un avis. Le public pourra également partager le sien lors d'une enquête publique unique. Prévue début 2025, elle sera pilotée par un ou plusieurs commissaire(s) enquêteur(s).

D'autres dossiers à venir

Ces travaux ne constituent pas le démarrage de la construction du centre de stockage Cigéo : seule

l'obtention du décret d'autorisation de création (DAC) de Cigéo, en cours d'instruction, le permettra. Nous reviendrons en détail sur ces premiers travaux préparatoires dans le prochain numéro du journal de l'Andra. ●



60 ha de fouilles



13 forages profonds répartis sur 4 plateformes



Campagne de reconnaissance archéologique réalisée en 2016.

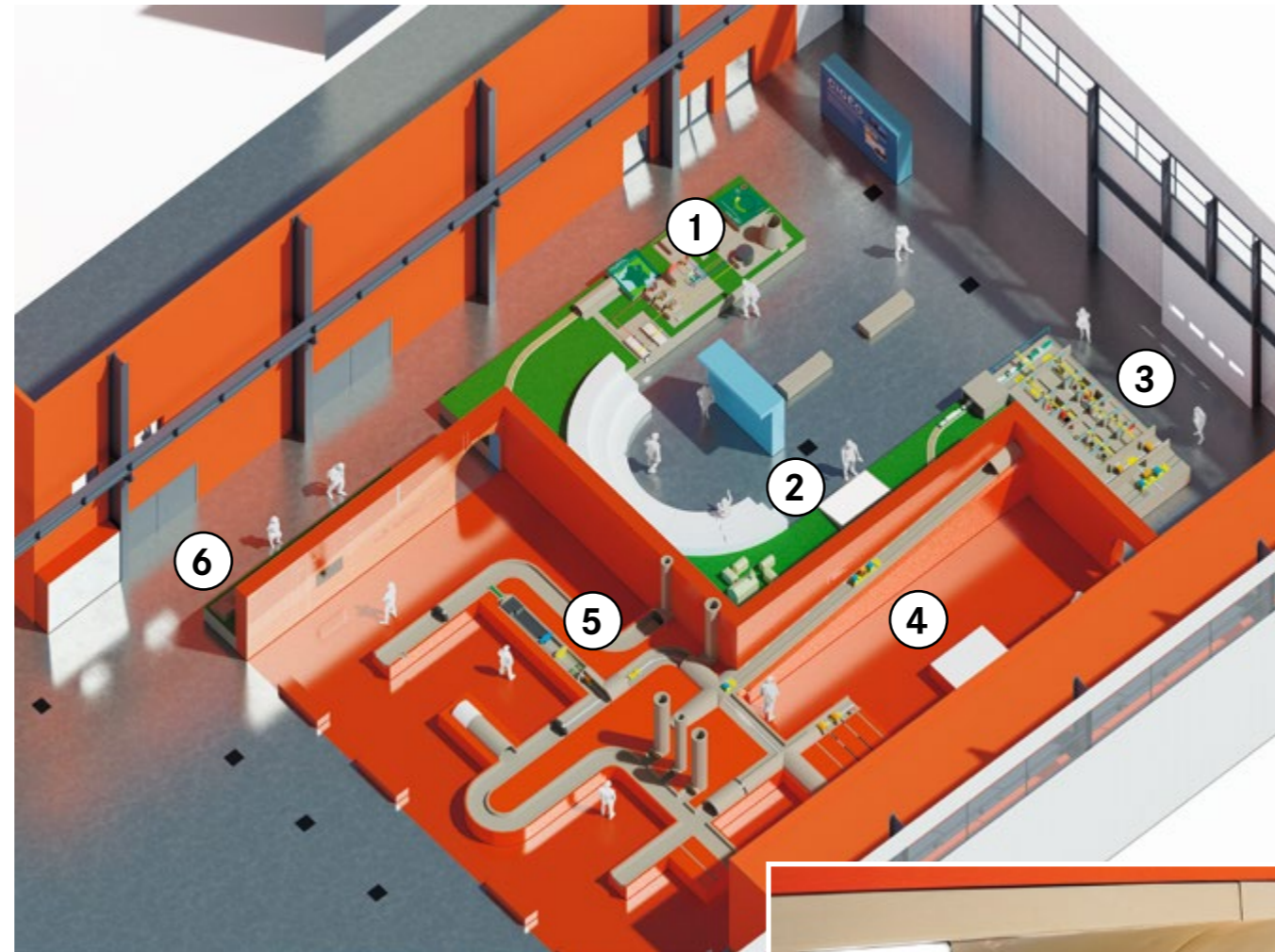
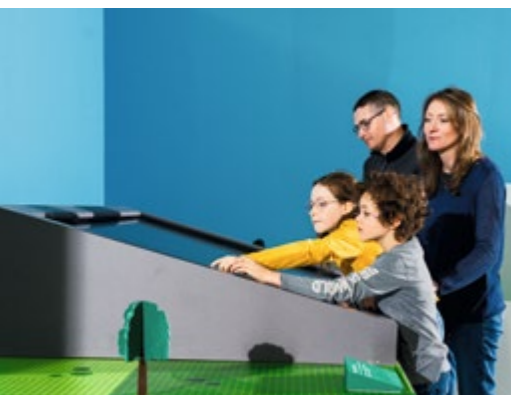
DESSUS/DESSOUS : un avant-goût de Cigéo

Depuis le 24 avril, les visiteurs peuvent découvrir une nouvelle exposition baptisée « DESSUS/DESSOUS » au Centre de l'Andra en Meuse/Haute-Marne. Elle propose une véritable immersion dans le projet Cigéo grâce à une maquette reproduisant les principales composantes des installations et leur fonctionnement. Suivez le parcours du colis de déchets radioactifs.

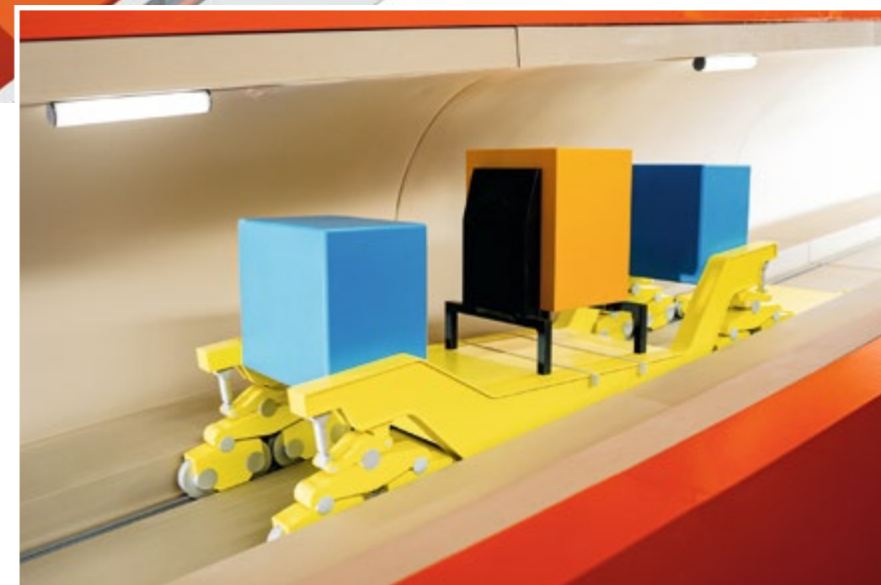
1
Première partie de la maquette exposant les enjeux du retraitement des combustibles usés des centrales nucléaires.



2
Espace présentant l'insertion de Cigéo dans le territoire. Un amphithéâtre facilite les échanges avec les visiteurs.



3
Zone de réception consacrée à la préparation et au contrôle des colis avant leur descente dans les installations souterraines.



4
Trajet de 0 à -490 m sous terre grâce au funiculaire.

DESSUS/DESSOUS, une exposition gratuite à découvrir à l'Espace technologique de Saudron. Toutes les informations sur meusehautemarne.andra.fr



6
Les études menées par l'Andra sur la façon de conserver et de transmettre la mémoire de Cigéo aux générations futures.



5
Les alvéoles de stockage des déchets HA et MA-VL.



Phase industrielle pilote de Cigéo : les attentes de la société civile

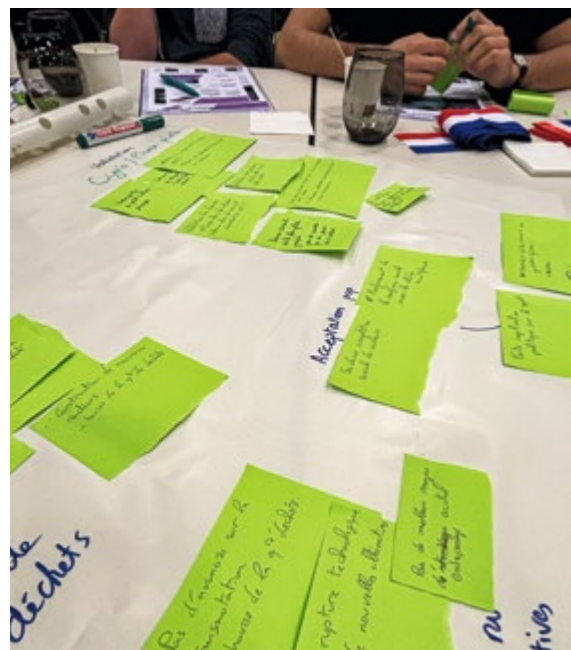
La phase industrielle pilote de Cigéo doit permettre un démarrage progressif et prudent de l'installation. Pour en préciser les contours, les enjeux et les attendus, l'Andra lance en 2024 une nouvelle concertation.

Si le projet Cigéo est autorisé, il débutera par une phase industrielle pilote comprenant *a priori* la construction, le démarrage de l'installation et les premières années d'exploitation du stockage. C'est en tout cas l'une des propositions de l'Andra concernant le déroulement de cette phase et qui est soumise, avec d'autres propositions, à concertation pendant l'année 2024. « L'objectif est, durant quinze à vingt-cinq ans, de confirmer les données utilisées pour la démonstration de sûreté de Cigéo, de s'assurer que l'Andra prend bien en main l'exploitation du stockage, et enfin de vérifier en condition réelle la capacité à récupérer les colis de déchets. Puis un vote du Parlement déterminera les conditions de poursuite du stockage », détaille Camille Peiffer, responsable concertation à l'Andra.



Lors d'un atelier, une trentaine d'étudiants ont voyagé dans le temps afin de voter une loi sur Cigéo.

Participez aux concertations et retrouvez tous les documents associés : concertation.andra.fr



Parlement 2050

Pour préciser les objectifs et critères de réussite de la phase industrielle pilote, l'Andra lance une concertation en 2024 et s'appuie sur un dispositif inédit. « Nous avons proposé à des étudiants volontaires de se mettre dans la peau de parlementaires qui, dans le futur et sur la base du bilan de la phase industrielle pilote, auront à décider des conditions de poursuite du stockage et de mettre en évidence les éléments nécessaires pour permettre cette décision », explique Camille Peiffer.

Comme ces étudiants venus de toute la France, les membres du Comité éthique et société (CES) de l'Andra se sont prêtés au même exercice. Un groupe de travail de l'Association nationale des comités et commissions locales

d'information (ANCCLI) est également mis à contribution. Enfin, des rencontres sont organisées depuis avril avec des parties prenantes du projet Cigéo. Des modules en ligne (voir lien ci-contre) complètent le dispositif de concertation pour l'ensemble du public à l'échelle nationale. « Ces différents échanges alimenteront le rapport que l'Andra produira à la fin de l'année », conclut Camille Peiffer. L'Andra avait mené une première concertation sur la phase industrielle pilote en 2021-2022. Elle avait nourri le dossier de demande d'autorisation de création (DAC). ●



L'atelier étudiant en vidéo : <https://vu.fr/EPNAN>



Entreposage des déchets les plus radioactifs : dans les coulisses du site Orano La Hague

En attendant leur stockage, une grande partie des déchets radioactifs destinés à Cigéo sont entreposés provisoirement sur le site Orano La Hague, dans la Manche, qui traite les combustibles usés du parc nucléaire français afin d'en extraire les matières valorisables. Explications.

Le retraitement des combustibles usés des centrales nucléaires fait partie de la politique énergétique française. De cette opération est extraite une petite portion du contenu des combustibles (environ 4 %) qui ne peut être valorisée. « Ils sont alors considérés comme des déchets radioactifs dans la mesure où aucune réutilisation n'est prévue ou envisagée », explique Sylvain Renouf, adjoint à la directrice de la Communication d'Orano La Hague. Ces déchets sont de deux sortes : de moyenne activité à vie longue (MA-VL) pour la structure métallique du combustible, et de haute activité (HA) pour les éléments radioactifs (essentiellement les produits de fission). Très dangereux pour de très longues durées, ils sont destinés à être stockés dans Cigéo. « En attendant



Entreposage de colis de déchets de haute activité vitrifiés.

PRÉPARER L'AVENIR

Orano La Hague adapte régulièrement ses capacités d'entreposage aux prévisions de traitement de la production nucléaire française, ainsi qu'à ses obligations contractuelles avec des pays étrangers⁽¹⁾. « Nous avons la capacité de construire de nouvelles installations d'entreposage à la fois sûres et adaptées aux besoins des clients d'Orano », indique Sylvain Renouf.

(1) Le stockage en France de déchets radioactifs en provenance de l'étranger est strictement interdit par la loi depuis 1991. Les déchets issus du retraitement de combustibles usés étrangers sont, à terme, retournés aux clients comme le prévoient les contrats de retraitement.

l'autorisation puis la mise en service du stockage, ils sont vitrifiés ou compactés, puis conditionnés et entreposés en toute sûreté dans nos installations », indique Sylvain Renouf.

Vitrifier et compacter

Avant leur entreposage, les déchets de haute activité (HA) sont vitrifiés, c'est-à-dire piégés dans une matrice en verre, puis coulés dans des conteneurs en acier inoxydable. Ils sont ensuite placés dans des puits ventilés pour évacuer la chaleur qui s'en dégage. Cinq ans plus tard, lorsque leur puissance thermique a suffisamment diminué, les colis sont déplacés dans des puits bénéficiant d'une ventilation naturelle.

« Ce système passif permet d'attendre sereinement l'ouverture de Cigéo, les bâtiments étant dimensionnés pour une exploitation de l'ordre du siècle », précise Sylvain Renouf. Quant aux déchets MA-VL, ils sont compactés dans un fût après avoir été découpés en fragments, plongés dans de l'acide nitrique et rincés. La galette ainsi formée est introduite dans un conteneur en acier inoxydable. Ces colis sont entreposés dans des alvéoles dans un bâtiment à plusieurs niveaux. ●



Pour en savoir plus : <https://vu.fr/lxHIM>





Radioactivité et radioprotection : les rayonnements sous contrôle

Nous sommes exposés en permanence à des sources de radioactivité, qu'elles soient naturelles ou artificielles. Si les usages de la radioactivité fournissent des services pour notre société, les rayonnements issus de ce phénomène peuvent présenter des effets néfastes pour la santé. Même s'ils sont invisibles, ces rayonnements sont détectables, mesurables et, surtout, il existe de nombreuses dispositions pour s'en protéger.

Que ce soit pour les travailleurs en environnement nucléaire, les patients en médecine nucléaire et plus largement l'ensemble de la population, toute exposition à la radioactivité nécessite des mesures de protection adaptées. Les différents principes, règles et mesures à mettre en œuvre pour assurer cette protection correspondent à ce qu'on appelle « la radioprotection » et s'appliquent également à la gestion des déchets radioactifs.

La radioactivité, invisible... et omniprésente !

Phénomène naturel aux nombreux usages industriels ou médicaux, la radioactivité est présente partout, mais n'est pas perceptible pour l'œil humain. Explications.

Tout corps, qu'il soit animal, végétal, minéral, est composé d'atomes.

La plupart des atomes sont stables et ne changent pas au fil du temps. Certains, en revanche, sont instables et cherchent à atteindre, plus ou moins rapidement, un état stable. Pour y arriver, le noyau de ces atomes va se transformer (on parle de « désintégration ») en libérant de l'énergie sous forme de rayonnements dits « ionisants », invisibles à l'œil nu. Ces rayonnements peuvent provoquer des effets différents sur l'organisme en fonction de l'activité, du type de rayonnement (alpha, bêta,

gamma), ou encore de l'organe et des tissus exposés. Si une simple feuille de papier suffit à arrêter un rayonnement alpha, il faut un important blindage de plomb ou de béton pour bloquer un rayonnement gamma.

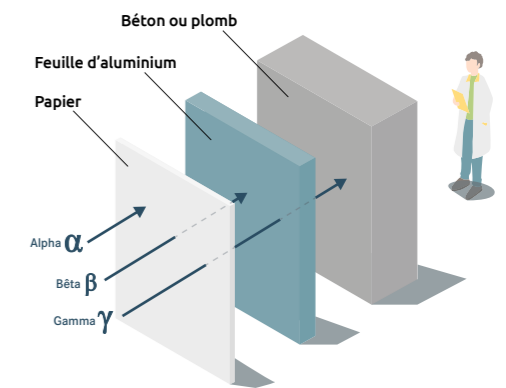
Ce phénomène appelé « radioactivité » est présent naturellement autour de nous : il est issu de la terre, du cosmos, ou présent dans les aliments. Après l'identification et la compréhension du phénomène, les scientifiques et les ingénieurs en ont développé des usages médicaux et industriels (pour produire de l'électricité, par exemple) : c'est la radioactivité artificielle.

4,5 mSv : c'est la dose moyenne reçue par une personne en France (dont 3,0 mSv d'origine naturelle et 1,5 mSv d'origine artificielle)⁽¹⁾. L'exposition varie en fonction des habitudes de vie, du lieu d'habitation ou de la fréquence des examens médicaux. Cela conduit à une dose annuelle très différente d'une personne à l'autre.

Estimez votre exposition sur le site de l'IRSN : expop.irsn.fr

(1) Résultats obtenus sur la base de l'ancien coefficient de dose radon (arrêté 2003).

Protection contre les différents types de rayonnement :



Les unités de mesure de la radioactivité

Trois unités sont fréquemment utilisées pour mesurer la radioactivité et son impact sur la matière vivante : le becquerel, le gray et le sievert. À quoi correspondent-elles ?

L'activité d'une source

Le becquerel (Bq) mesure l'activité de la source radioactive, c'est-à-dire le nombre de noyaux d'atomes qui se désintègrent par seconde et émettent un rayonnement. Cette mesure s'applique aussi bien à un volume qu'à une masse ou à une surface. Anciennement, l'unité de mesure utilisée était le curie (Ci).

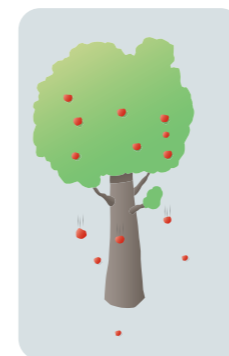
La dose absorbée

Le gray (Gy) mesure la dose absorbée par la matière exposée aux rayonnements. On peut la mesurer en fonction du temps d'exposition (Gy/s ou Gy/h). Anciennement, l'unité de mesure utilisée était la radiation absorbed dose (rad).

Les effets d'une dose

Le sievert (Sv) évalue l'impact du rayonnement sur la matière vivante. Cette unité permet de pondérer les effets des rayonnements (alpha, bêta, gamma) selon leur dangerosité pour le corps humain (on parle de « dose équivalente »), et selon la nature du tissu ou de l'organe exposé (on parle de « dose efficace »). Cet impact s'exprime généralement en sievert ou en millisievert (1 Sv = 1 000 mSv). Anciennement, l'unité de mesure utilisée était le röntgen equivalent man (rem).

Lorsque l'on compare un pommier à une source radioactive...



Le nombre de pommes qui tombent peut se comparer au **becquerel** (nombre de désintégrations par seconde).



Le nombre de pommes reçues par le dormeur peut se comparer au **gray** (dose absorbée).



L'effet laissé sur le corps selon le poids ou la taille des pommes peut se comparer au **sievert** (effet produit).

Radioactivité : quelle exposition pour quels effets ?

Quel est l'impact de la radioactivité sur la santé ? Comment sont déterminées les doses à ne pas dépasser ? On fait le point.

Il existe deux types principaux d'expositions aux rayonnements ionisants. On parle d'irradiation lorsqu'on est exposé aux rayons émis par une source extérieure. Dans ce cas, l'exposition cesse dès le retrait de la source d'exposition. On parle de contamination interne lorsque des particules radioactives pénètrent l'organisme par inhalation, ingestion, au travers de la peau ou éventuellement par une blessure. Dans ce cas, l'exposition se poursuit tant que la source n'est pas éliminée du corps.

Déterministes ou stochastiques ?

Deux types d'effets sont à distinguer : les effets dits « déterministes » et ceux dits « stochastiques ».

Les premiers sont des effets à court terme (heures, jours, semaines) se manifestant essentiellement sous forme de syndrome aigu d'irradiation, pour les expositions du corps entier à forte dose, ou sous forme de « brûlure radiologique », pour des expositions localisées, également à forte dose. Au-delà du seuil d'apparition de ces effets, la gravité augmente en fonction de la dose reçue.

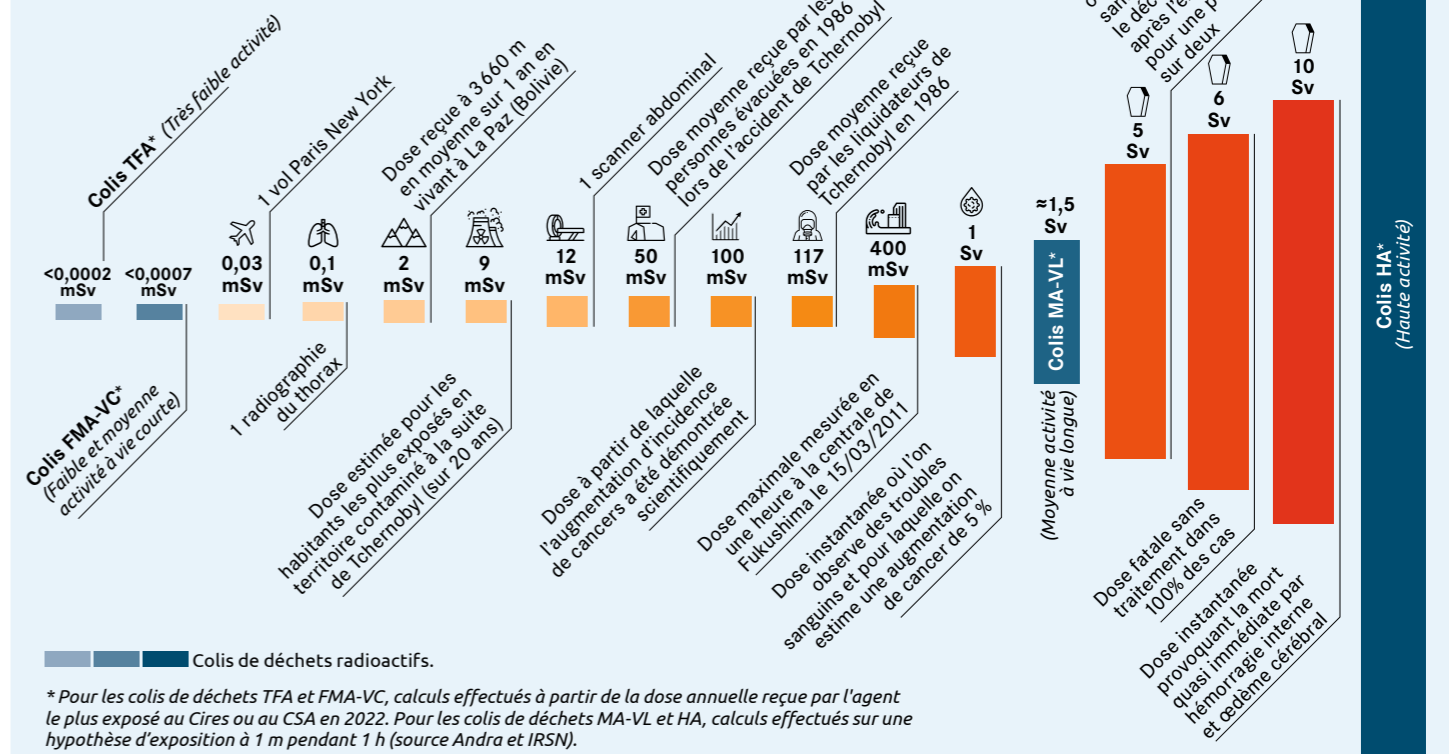
Les effets stochastiques, quant à eux, sont des effets à long terme, essentiellement sous forme de cancer, qui peuvent être observés de manière aléatoire à partir de doses faibles. Leur probabilité d'apparition augmente avec la dose. L'appréciation du risque reste cependant difficile : les cancers radio-induits surviennent longtemps après l'exposition et ne présentent pas de caractéristiques particulières permettant de les distinguer de cancers liés à d'autres causes (tabac, alcool, alimentation, etc.).

En 2012, dans son rapport à l'assemblée générale des Nations unies², l'*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)* établit schématiquement une échelle de doses pour une exposition du corps entier. Un premier palier est défini à 100 mSv. En effet, au-delà, les études épidémiologiques historiques ont observé statistiquement un excès de risque de cancer. On parle donc de faible dose au-dessous de 100 mSv et de dose modérée au-delà. On entre dans le domaine des fortes doses à partir de 1 000 mSv environ et l'apparition d'effets directs sur la santé (effets déterministes).

Pas de risque zéro

« Les effets sur la santé humaine d'une exposition à des doses inférieures à 100 mSv font toujours l'objet de débats, tant sur l'existence d'un seuil en deçà duquel on pourrait considérer qu'il n'y a pas d'effet sur la santé que sur la forme de la relation entre la dose reçue et la probabilité de développer un cancer. Les épidémiologistes et biologistes cherchent à réduire les incertitudes relatives à la relation entre l'exposition à des faibles doses et le risque de cancer », indique Yann Billarand, adjoint au directeur de la Santé de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Pour cela, ils suivent des cohortes de plus en plus importantes. Les résultats récents, montrant que le risque de développer un cancer est augmenté à partir d'une exposition de quelques dizaines de mSv, pourraient amener à considérer une révision de la classification des doses par l'UNSCEAR. De plus, ces résultats ne permettent pas de conclure qu'il existe un seuil de dose en dessous duquel il n'y aurait pas de risque de cancer lié aux rayonnements ionisants.

L'exposition aux rayonnements ionisants : du quotidien aux situations accidentelles (Échelle non représentative)



L'épidémiologie conforte ainsi le modèle mathématique dit « modèle linéaire sans seuil »³, sur lequel s'appuie la gestion du risque, même s'il est reconnu aujourd'hui que tous les mécanismes biologiques impliqués lors de la formation d'un cancer ne réagissent pas

tous de la même manière selon les doses reçues. Dans ce modèle, l'excès de risque de développer un cancer augmente proportionnellement à la dose de rayons ionisants reçue : à dose élevée, le risque est plus élevé qu'à dose faible. En considérant qu'il n'existe pas

de risque nul, même à très faible dose, le modèle permet de fixer des limites d'exposition correspondant à un niveau de risque jugé tolérable.

(1) Appelés désormais « réactions tissulaires ».
 (2) <https://vu.fr/quyJ>
 (3) <https://vu.fr/sySvP>

Les dates clés de la radioprotection

1895 Découverte par Wilhelm Röntgen des rayons X et de la radiographie, rapidement adoptés par les médecins et les dentistes. Ces derniers décrivent leurs premières constatations sur les dommages causés par les rayons sur la peau des mains.



1898 Pierre et Marie Curie découvrent le radium et le polonium et nomment « radioactivité » l'émission de leurs rayonnements particuliers.



1904 Premier décès attribué aux rayonnements ionisants : Clarence Dally, un assistant de Thomas Edison.



1899 Ernest Rutherford met en évidence l'existence de deux types de rayonnements radioactifs avec des pouvoirs de pénétration différents, qu'il baptise alpha et bêta. L'année suivante, Paul Vilard y ajoute un troisième type, baptisé gamma.

1928 Mise au point du compteur Geiger-Müller qui permet de mesurer les rayonnements radioactifs, et création du Comité international de protection contre les rayons X et le radium. Jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, la protection radiologique concerne uniquement le personnel médical et est fondée sur l'existence de seuil d'effets.



1911 Un lien est établi entre la pratique de la radiothérapie et le développement de la leucémie.

1950 Recommandation d'une « dose maximale admissible » fixée à 0,5 rem par semaine (250 mSv/an). Le Comité international de protection contre les rayons X et le radium se rebaptise Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Les principes de la radioprotection s'étendent à l'ensemble du public et plus seulement aux travailleurs du secteur avec le développement du nucléaire civil.



1934 Recommandation d'une « dose tolérable » fixée à 0,2 rem par jour, ce qui équivaut à environ 700 millisievert (mSv) par an.

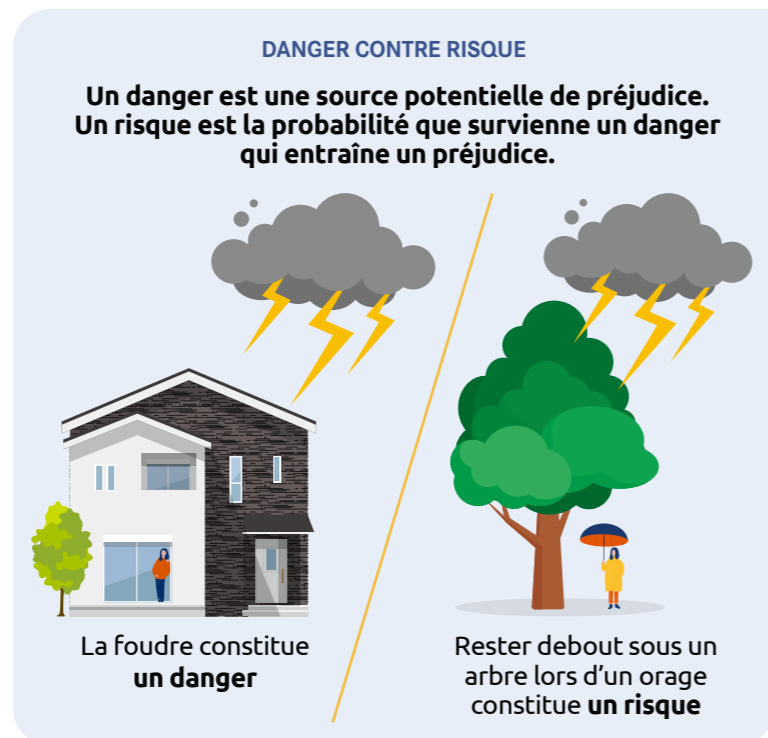
Radioprotection : se protéger des radiations

La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) définit les grands principes de gestion du risque d'exposition aux rayonnements ionisants et émet des recommandations qui sont reprises par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et la Commission européenne afin de définir les normes de base de la radioprotection. La CIPR est ainsi à l'origine de la plupart des normes et des réglementations de radioprotection. Entretien avec deux de ses membres.

La radioprotection telle que définie par la CIPR s'appuie sur trois grands principes : la justification, l'optimisation et la limitation de dose, que l'on retrouve dans les réglementations de tous les pays.

« Pour toute nouvelle source de radioactivité qui pourrait générer une exposition, qu'il s'agisse de la construction d'un centre de stockage de déchets radioactifs ou du diagnostic médical d'un patient, la justification consiste à vérifier que la présence ou l'utilisation des rayonnements apporte plus d'avantages que d'inconvénients », résume Thierry Schneider, président du comité permanent sur l'application du système de la CIPR. Un exercice parfois complexe, lorsqu'il s'agit par exemple de comparer des bénéfices sociétaux ou économiques et un risque inhérent à une exposition, même à des doses très faibles.

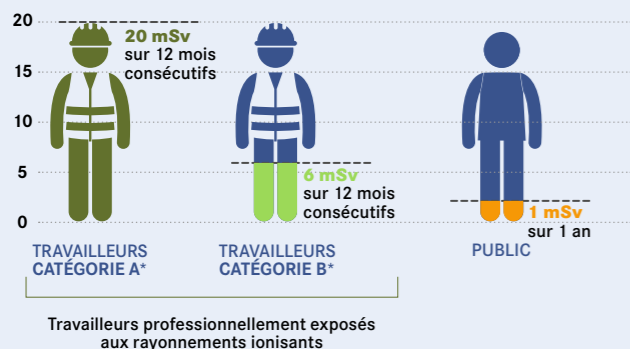
L'optimisation consiste quant à elle à réduire l'exposition au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre en fonction des objectifs poursuivis (principe ALARA), en prenant en considération les aspects économiques, sociétaux



et environnementaux. Pour cela, on peut agir sur l'intensité de la source du rayonnement, sur la fréquence ou la durée des expositions, ou encore sur des dispositifs de protection individuels ou collectifs. Enfin, le dernier principe concerne

la limitation de dose. « Il s'agit de contenir le niveau des expositions aux rayonnements ionisants en fixant des critères de dose pour les travailleurs, pour le public, mais aussi pour la faune et la flore », explique Dominique Laurier, président du comité permanent de la CIPR sur les effets des rayonnements ionisants sur la santé de l'homme et de l'environnement. En France, les recommandations de la CIPR ont notamment été inscrites dans le Code du travail, qui fixe une limite de dose annuelle réglementaire de 20 mSv pour les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants, et dans le Code de la santé publique qui préconise une limite annuelle d'exposition pour la population de 1 mSv, en dehors des expositions médicales et naturelles. « En réalité, cette valeur de 1 mSv est destinée à limiter l'exposition aux rayonnements ionisants

LIMITE DE DOSES RÉGLEMENTAIRES PAR CATÉGORIE DE PERSONNES (hors radioactivité naturelle et médecine)



5 mSv/an

Limite de doses fixée par l'Andra pour les travailleurs en zone délimitée

* Catégories définies selon l'évaluation préalable de l'exposition par l'employeur, conformément aux dispositions du Code du travail.



Opérateur équipé sur un chantier d'assainissement.

qui pourrait affecter le public, par exemple autour d'installations nucléaires. La radioactivité naturelle représente en moyenne, en France, une dose de 3 mSv/an. Il ne faut pas considérer ce 1 mSv comme une limite de risque mais comme une valeur de gestion de l'exposition dans des situations particulières », précise Dominique Laurier.

Des enjeux sociétaux

Plus les doses sont faibles, plus les risques sont faibles. « Pour autant, nous ne pouvons pas dire qu'un risque est nul ou même acceptable pour tel niveau de dose,

même très bas. Nous sommes en train de réviser nos recommandations de 2007⁽¹⁾ pour tenir compte de l'évolution des connaissances scientifiques, mais aussi des exigences de la société. Les principes de justification et d'optimisation intègrent des dimensions sociétales, éthiques, à mettre en regard des considérations techniques ou économiques. L'acceptabilité d'un risque ne dépend pas que d'une valeur radiologique », détaillent les deux experts, soulignant la nécessité d'associer largement les parties prenantes à la radioprotection.

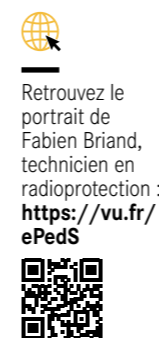
(1) La révision en cours fait l'objet d'un article scientifique : <https://vu.fr/Sbruz>

Dans les coulisses des centres industriels de l'Andra



Contrôle radiologique de déchets TFA.

En tant qu'exploitant nucléaire en charge d'installations de stockage de déchets radioactifs, l'Andra a la responsabilité de protéger aussi bien les riverains, le public que les travailleurs. Comment cela se traduit-il sur le terrain ? Zoom sur les centres de l'Aube.



Le conditionnement et le stockage des colis de déchets radioactifs peuvent générer des risques liés aux rayonnements ionisants. Ces activités sont ainsi fortement encadrées par des exigences réglementaires. « Une partie importante de notre travail consiste à nous tenir constamment informés des évolutions de la réglementation, confie ainsi Philippe Valentin, ingénieur en radioprotection de l'Andra dans

l'Aube. Deux pôles de compétences en radioprotection sont constitués, un en lien avec les travailleurs et les installations qui relève globalement des dispositions du Code du travail, tandis que le second concerne l'environnement et la population et relève globalement du Code de la santé publique. » Cette organisation, dont les modalités sont prévues par arrêté, est spécifique aux installations

nucléaires de base (INB), comme le Centre de stockage de l'Aube (CSA). Dans les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), telles que le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires), cette même fonction est assurée par des conseillers en radioprotection. Dans les deux cas, leurs missions sont les mêmes. Au titre de la



Contrôle radiologique pieds-mains en sortie de zone au Centre de stockage de la Manche.

protection des travailleurs et des installations, il s'agit notamment du conseil pour l'aménagement des lieux de travail et le suivi de l'exposition des travailleurs, de la définition des zones délimitées et de leurs conditions d'accès, ainsi que l'évaluation des risques, la mise en œuvre de mesures de prévention et de protection et l'analyse d'événements significatifs. Pour ce qui a trait à l'environnement et à la population générale, les équipes de l'Andra participent à la définition du programme de surveillance radiologique de l'environnement, aux modalités de gestion des déchets radioactifs, ou encore à la réception et au contrôle des sources de rayonnement.

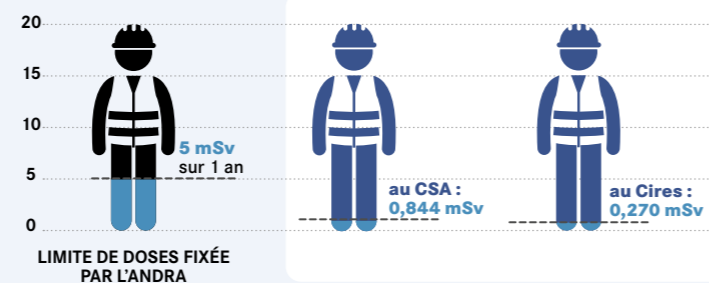
Des risques concrets et maîtrisés

À regarder les chiffres [voir encadré], les mesures de prévention sont efficaces : dans les centres de l'Andra dans l'Aube et dans la Manche, les travailleurs les plus exposés aux rayonnements ionisants présentent une dose équivalente annuelle maîtrisée et faible, bien en dessous des limites imposées par la réglementation. Les expositions externe et surtout interne font en effet l'objet d'une attention particulière.

« En ce qui concerne les risques d'exposition externe, sa maîtrise repose sur le principe "temps, distance, écrans", raconte Philippe Valentin. D'une part à l'aide de protections collectives intégrées en conception dans nos installations (verre au plomb des cabines des ponts de stockage, blindage d'équipements, spécifications des colis, etc.) et, d'autre part, via nos méthodes de travail. En ce qui concerne l'exposition interne, ce risque n'est présent que dans certaines situations, lorsque le déchet n'est plus confiné dans son colis (compactage des fûts 200 litres, carottage de colis, etc.). La protection collective repose par ailleurs sur un confinement statique (murs) en lien avec un confinement

dynamique (ventilation). Des équipements de protection individuelle sont également associés. Cela va de la combinaison en coton au scaphandre complet, associé à un appareil de protection des voies respiratoires. » Enfin, le personnel de l'Andra n'est pas le seul concerné par ces mesures de prévention. « Même si, d'un point de vue réglementaire, la radioprotection de nos sous-traitants et prestataires relève de la responsabilité de leurs employeurs, en tant qu'exploitants nous les assistons en évaluant les risques avec eux et nous élaborons ensemble un plan de prévention avant le démarrage de toute prestation », détaille l'expert de l'Andra.

DOSE ANNUELLE DU TRAVAILLEUR* LE PLUS EXPOSÉ (EN 2023)



* Salariés de l'Andra et prestataires.

Bientôt un indicateur de la nocivité des déchets radioactifs ?

Avec l'IRSN et les producteurs de déchets radioactifs, l'Andra travaille à l'élaboration d'un indicateur de la nocivité à intégrer à l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs. Pour s'assurer qu'il réponde bien aux questions du grand public, un groupe pluraliste sera associé à sa conception.

À l'origine de cet exercice, un avis de l'Autorité environnementale estimait que les informations fournies par le Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) ne permettaient pas à un lecteur non averti d'apprécier la nocivité de chaque matière et déchet ainsi que son évolution à court, moyen et long terme. Un arrêté⁽¹⁾ a donc demandé à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) de produire « un rapport sur la méthodologie et les critères envisageables pour apprécier la nocivité des matières et déchets radioactifs ». En parallèle, l'Andra a également lancé sa propre réflexion sur le sujet, en collaboration avec le Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN).

« Il s'agit d'un exercice complexe, car la nocivité d'une substance radioactive s'apprécie selon de multiples paramètres : la nature de l'exposition, sa durée, le niveau de décroissance de l'élément radioactif ou encore son conditionnement, explique Mélanie Maître, ingénieure en charge du développement de l'indicateur de la nocivité. Il faut tenter d'informer sur ces différentes composantes, ainsi que sur les risques chimiques et l'exposition de la faune et de la flore sauvages, dans un indicateur unique facile et compréhensible par tout un chacun. »

Une nouvelle approche

Après les premiers échanges sur la méthodologie à mettre en place, le PNGMDR 2022-2026 a demandé aux contributeurs de poursuivre le travail, cette fois sous le pilotage de l'Andra. En mars 2024, un premier pas a été franchi : « Avec l'IRSN et les

représentants des producteurs de déchets radioactifs, nous sommes parvenus à nous mettre d'accord sur l'unité à considérer (un colis de déchets radioactifs et non un déchet seul sans conditionnement) ainsi que sur les situations d'exposition à évaluer pour refléter aussi bien les enjeux chimiques, radiologiques et écotoxicologiques. Cela permet de comparer la nocivité des colis de déchets, et ce à différentes échelles de temps : au moment de sa fabrication, à 500 ans, 1 000 ans, 10 000 ans et 100 000 ans », résume Mélanie Maître.

À partir de ces propositions, un groupe de travail pluraliste constitué par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) doit déterminer l'indicateur de nocivité qui sera le plus adapté pour informer le grand public. L'objectif étant de l'intégrer dans la prochaine édition de l'Inventaire national.

(1) <https://vu.fr/Edqas>



Inventaire national des matières et déchets radioactifs.



Contrôle radiologique d'un colis de déchets radioactifs.

____PORTRAIT____

Michaël Fauquet : l'étude des impacts environnementaux, un travail d'endurance !

À l'Andra, Michaël Fauquet recense et évalue les impacts potentiels du projet Cigéo sur l'environnement. Son rôle : apporter les garanties aux services de l'État, mais aussi au grand public, que tous seront limités, quand ils ne pourront être totalement évités et, le cas échéant, compensés. Un travail de fond essentiel pour l'avancée du projet et l'obtention des autorisations nécessaires pour certains travaux.



Michaël Fauquet

Sur Cigéo, on travaille sur le temps long. Michaël Fauquet, qui vient de passer neuf ans à coordonner les premières études d'impact environnemental du projet, en sait quelque chose. « *Compte tenu des enjeux environnementaux du projet et de notre niveau d'exigence, ces études sont très complexes*, explique-t-il. *Le premier dossier réglementaire concernant les travaux préparatoires à Cigéo [voir article page 7] compte ainsi de nombreuses pages recensant et évaluant toutes les incidences sur la faune et la flore des premières opérations de caractérisation hydrologiques et géotechniques ainsi que des premières fouilles archéologiques.* »

Des missions variées et formatrices

À l'origine, pourtant, rien ne le prédisposait à ces missions cruciales pour l'Agence. « *J'étais évidemment intéressé par les questions d'environnement et de préservation du milieu naturel, mais, avec mon BTS Qualité Environnement, j'étais plutôt parti pour travailler dans l'agroalimentaire.* » C'est donc « *juste pour voir* » qu'il postule en 2002 à l'Andra... qui le recrute pour assurer le suivi qualité environnement des chantiers de construction du Laboratoire souterrain de l'Andra en Meuse/Haute-Marne. « *Sans doute en raison de mon goût prononcé pour les sciences et de ma curiosité* », suppose-t-il. C'est grâce à cette curiosité qu'au gré des nombreuses missions qui se sont enchaînées ensuite Michaël a pu élargir le champ de ses connaissances et expertises. « *Les échanges continus avec des experts de haut niveau dans tous les domaines et la formation interne m'ont permis de monter en compétences et de trouver ma place dans un monde de chercheurs et d'ingénieurs.* »

« **Bien connaître l'environnement ne suffit pas. Il faut savoir écouter les opérationnels pour comprendre leurs enjeux et intégrer tous les impacts.** »

Savoir écouter

Au-delà de solides capacités de synthèse, c'est la qualité d'écoute qui est déterminante dans sa fonction pour avoir une compréhension fine des enjeux de chaque décision. « *Bien connaître l'environnement ne suffit pas. Il faut savoir écouter les opérationnels – techniciens de forage, chefs de chantier, archéologues... – pour comprendre leurs enjeux sur le terrain et évaluer tous les impacts environnementaux d'un projet.* » Cette écoute est aussi ce qui l'aide à jouer son rôle d'animateur des équipes. « *Maintenir l'énergie individuelle et collective est un enjeu majeur sur les projets au long cours. Connaître les appétences de chacun me permet, le moment venu, de proposer aux uns et aux autres de s'ouvrir à de nouvelles missions.* » La clé pour ne pas s'essouffler, parole d'un coureur de semi-marathon !



Pour découvrir le portrait vidéo de Michaël Fauquet : <https://vu.fr/nqLNU>



« **Le Comité éthique et société, un espace où l'on peut débattre de sujets complexes de manière libre et dépassionnée.** »



Entretien avec Dominique Le Guludec, nouvelle présidente du Comité éthique et société

Depuis décembre 2023, Dominique Le Guludec est la nouvelle présidente du Comité éthique et société (CES). Elle revient sur son parcours, ses ambitions et les prochains chantiers qui attendent le Comité.

Pourquoi avoir accepté la présidence du Comité éthique et société ?

J'ai accepté cette mission par désir de mettre mes compétences et mon expérience au service d'une instance qui porte sur des enjeux éthiques. C'est l'un des derniers espaces où l'on peut débattre de sujets complexes de manière libre et dépassionnée. J'ai également accepté par curiosité. Animer les échanges d'une quinzaine de personnalités remarquables, expertes dans des domaines aussi divers que le droit, l'économie, l'information, la philosophie, la physique ou la chimie, ne peut que m'enrichir !

Vous êtes cardiologue, spécialiste en médecine nucléaire, et vous vous intéressez de longue date aux enjeux de la radioprotection. Cela oriente-t-il votre approche ?

Il est vrai que j'ai acquis certaines compétences en présidant le conseil

d'administration de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, puis la Haute Autorité de santé. Avoir approché de près les questions de dosimétrie et de radioprotection m'épargnera en partie un lourd travail de mise à niveau technique. Cela dit, j'ai commencé par visiter les centres de l'Andra, car je ne peux en effet réfléchir que sur du concret, seul garde-fou contre les fantasmes et les peurs. Descendre dans le Laboratoire souterrain m'a fait toucher du doigt l'échelle exceptionnelle du projet Cigéo, et j'en suis ressortie avec de nombreuses questions sur lesquelles nous allons maintenant travailler.

Quels sont vos premiers objectifs ?

Nous allons d'abord participer à la concertation sur les objectifs et les critères de réussite de la phase industrielle pilote de Cigéo. Nous allons ensuite suivre de près le développement du projet de stockage des

La mission du CES

Rattaché au conseil d'administration de l'Andra, le Comité éthique et société regroupe des personnalités qualifiées indépendantes aux expertises plurielles. À travers ses avis et recommandations publics, le CES a pour mission d'éclairer, d'évaluer et de faire progresser l'Agence sur :

- la prise en compte effective des enjeux éthiques, citoyens et sociétaux dans ses activités et ses projets;
- le dialogue et l'implication de ses parties prenantes et intéressées;
- l'orientation de ses recherches dans le champ des sciences sociales.

déchets de faible activité à vie longue (FA-VL), sur lequel nous venons de rendre un avis. Enfin, nous avons décidé de nous saisir des trois questions éthiques identifiées dans le cinquième Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) : l'attention portée aux générations futures, l'approche du risque et la confiance dans l'expertise scientifique, en lien avec la décision publique. ●



Voir en vidéo : <https://vu.fr/LiYNa>



Les robots de l'extrême : au cœur d'une alvéole de stockage de Cigéo

En 2023, l'Andra a testé en grandeur réelle plusieurs robots destinés au projet Cigéo. Leur mission : inspecter l'état des alvéoles de stockage et des colis de déchets radioactifs de moyenne activité à vie longue (MA-VL) et intervenir pour corriger d'éventuels défauts.

Si l'Andra étudie depuis plus de trente ans différentes options techniques pour le stockage géologique de déchets radioactifs dans Cigéo, une constante demeure : la nécessité d'assurer la surveillance régulière des installations et des colis de déchets radioactifs dans leurs alvéoles de stockage, voire de les retirer dans le cadre de la réversibilité de Cigéo. La tâche est ambitieuse, notamment pour les déchets radioactifs MA-VL. Selon les différentes familles de colis, chaque alvéole pourrait en accueillir plus de 1 000, stockés sur plusieurs rangées et niveaux, avec un espacement limité entre eux : environ 10 cm. Difficile, dans ces conditions, d'envisager des solutions de surveillance et d'intervention !

C'est pourtant le défi qu'a relevé

Bouygues Construction Expertises Nucléaires⁽¹⁾, retenu par l'Andra pour concevoir, réaliser et tester des engins capables d'inspecter les alvéoles et les colis de stockage, mais également de mener des actions correctives si nécessaire. La société opère dans le cadre d'un groupement avec NFM Systems⁽²⁾, qui expérimente en parallèle un démonstrateur de pont stockeur pour les colis MA-VL, dont les rails permettront aux robots d'inspection et d'intervention de se déplacer dans les alvéoles. « Nous avons imaginé un chariot installé sur ces rails, le long de l'alvéole, auquel sont arrimés différents engins et outils selon le type d'inspection ou d'intervention à effectuer », résume Élodie Muller, ingénieure mécanique et cheffe de projet chez Bouygues Construction Expertises Nucléaires.

Environnement contraint

Un chariot de transport, un chariot de secours, deux outils d'inspection et sept outils d'intervention : une flotte entière de robots constituera ainsi les yeux et les bras de l'Andra dans les alvéoles de stockage MA-VL de Cigéo.



Outil « ROCO », engin d'intervention pour la récupération d'objets.

Tous ont été testés dans la reproduction schématique grandeur réelle d'une alvéole de stockage sur un ancien site industriel dans l'est de la France.

Les colis de stockage MA-VL étaient simulés à l'aide de blocs de béton de géométrie, masse et dimension représentatives (soit environ 1,5 m de long par 1,5 m de large et 2 m de haut), empilés en trois rangées sur trois couches. L'objectif étant de vérifier la capacité des robots à évoluer dans cet environnement contraint. « En fonctionnement normal, les inspections sont nécessaires dans deux cas : pendant le remplissage de l'alvéole de stockage, puis pendant les phases de surveillance pour contrôler régulièrement les installations et les colis. Les robots peuvent également être engagés dans un troisième cas : une situation post-incident, et ce

afin de réaliser une cartographie interne de l'alvéole ou d'une zone », explique Yves Lorillon, chargé d'affaires à l'Andra.

Un outil unique au monde

Chaque engin aura une fonction bien définie. Le chariot automoteur permettra par exemple le transport et l'alimentation des autres outils et l'inspection de l'« oreille » de l'alvéole, c'est-à-dire la zone aménagée de chaque côté de la paroi où sont installés les rails du pont stockeur. Côté inspection, l'outil « POUTRE », qui se déplace à cheval sur les deux rails, servira à l'inspection globale de l'environnement via une caméra, des lasers et un scan 3D intégrés. L'outil « RIDEAU », quant à lui, se déplacera sur un seul rail et permettra des mesures plus fines par laser (avec une précision de l'ordre du millimètre), caméra, sonde de température ou encore sonde pour mesurer la radioactivité. Unique au monde, il a fait l'objet de trois brevets déposés par l'Andra : un pour l'outil global, un autre pour la tête instrumentée, capable de plonger entre deux colis, et un troisième pour la chaîne qui lui permet d'évoluer sur toute la surface d'un ou plusieurs colis à inspecter.

Quant aux outils d'intervention, trois d'entre eux sont également brevetés par l'Andra. Il s'agit des robots « UMA » et « AMBRE », capables d'intervenir sur le rail le

long de l'alvéole (usage, colmatage), et de « MENTHE », qui permet d'installer un dispositif de guidage pour le câble d'alimentation du pont stockeur, dans le cadre d'un mode de secours. Le caractère innovant de ces équipements repose sur la création d'outillages sur mesure, adaptés à la géométrie de l'alvéole de stockage et permettant une maintenance sûre et à distance. « Nous avons par exemple employé du matériel standard dont nous avons détourné l'usage, comme des outillages électroportatifs du type

ponceuse à bande ou brosseuse », dévoile Élodie Muller.

Anticiper les imprévus

Au cours des essais, toutes sortes de situations dégradées ont été imaginées : colis mal positionnés, chute d'un morceau de béton, dégradation de l'état ou de la pente du chemin de roulement, etc. Enfin, si ces robots ont été conçus pour des colis de stockage de forme cubique, la campagne d'essais a été aussi l'occasion d'évaluer dans quelle mesure ils pourraient être employés pour inspecter des colis de forme cylindrique, comme les colis en stockage direct (c'est-à-dire sans être mis préalablement dans des conteneurs de stockage).

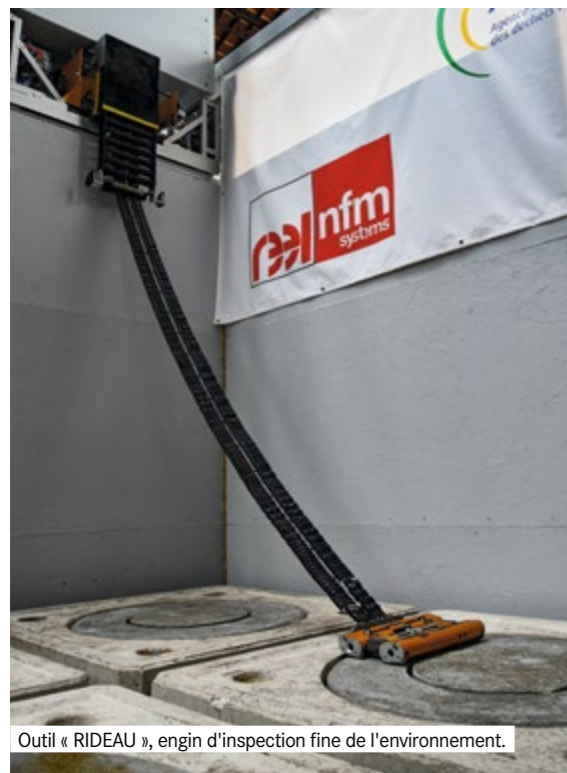
La campagne d'essais s'est terminée en décembre 2023 et a été suivie d'une visite de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). « Ces prototypes seront amenés à évoluer d'ici à la mise en service de Cigéo, et de nombreux développements restent encore à faire », conclut Yves Lorillon. ●

(1) Filiale de Bouygues Construction proposant des solutions/équipements pour les infrastructures nucléaires.

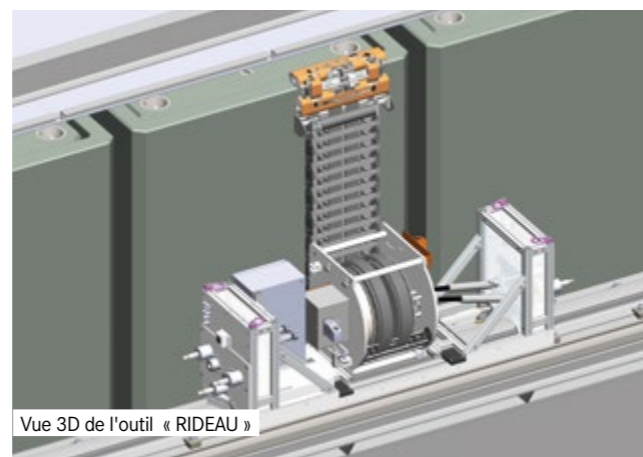
(2) Société spécialisée dans les systèmes de levage et de manutention complexes et dans les solutions de systèmes intégrés pour divers secteurs (nucléaire, défense, etc.).



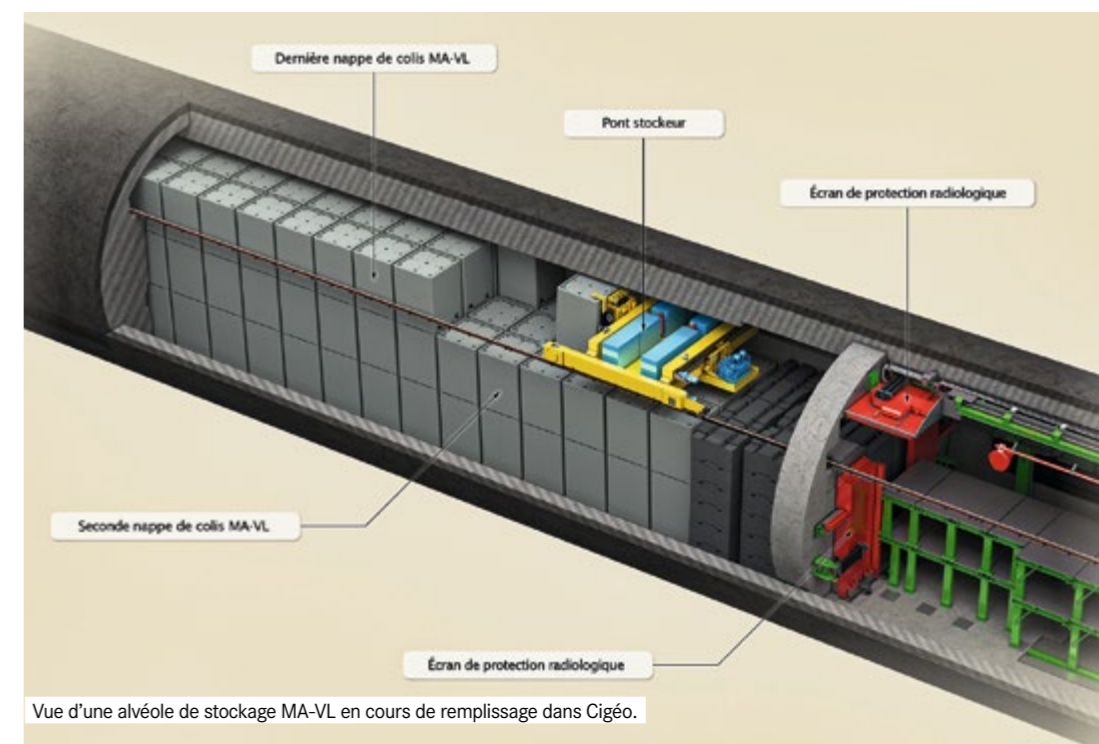
Voir les tests des robots en vidéo : <https://vu.fr/DqrNH>



Outil « RIDEAU », engin d'inspection fine de l'environnement.



Vue 3D de l'outil « RIDEAU »



Vue d'une alvéole de stockage MA-VL en cours de remplissage dans Cigéo.

Relance du nucléaire : quels impacts sur la gestion des déchets radioactifs ?

Le plan de relance du nucléaire français prévoit la construction de six réacteurs de type EPR2, dont les deux premiers, s'ils sont autorisés, pourraient être mis en service à partir de 2035. Quelles conséquences sur le volume des déchets radioactifs qui seraient produits ?

La décision de lancer les six premiers réacteurs en projet de type EPR2 s'est accompagnée en amont d'un rapport⁽¹⁾ du gouvernement évoquant notamment les conséquences sur la gestion des déchets radioactifs. Ce dernier souligne que les déchets générés par ces réacteurs ont des caractéristiques similaires à ceux déjà produits par le parc de centrales nucléaires actuellement en fonctionnement en France. Il s'agit en effet majoritairement de déchets de très faible activité (TFA) et de faible et moyenne activité, principalement à vie courte

(FMA-VC), produits notamment lors d'opérations de maintenance ou lors de leur exploitation courante, mais également de déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) et de haute activité (HA) issus du retraitement des combustibles usés. La prise en charge par l'Andra de ces déchets radioactifs vers les filières de stockage adaptées s'accompagne d'une analyse technique et d'un processus démocratique et réglementaire. ●

(1) https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2022.02.18_Rapport_nucleaire.pdf



LA PRISE EN CHARGE DES DÉCHETS PRODUITS PAR SIX RÉACTEURS EPR2



Stockage de déchets TFA au Cires.

DÉCHETS TFA

Depuis 2003, c'est au Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) que sont pris en charge par l'Andra les déchets TFA.

- **Capacité de stockage autorisée du Cires** : 650 000 m³
- **Taux de remplissage à fin 2023** : 72,2 %. Selon les estimations actuelles, uniquement basées sur les volumes produits par les installations nucléaires déjà autorisées, le Cires devrait atteindre sa capacité maximale autorisée vers 2030. Le projet Acaci pourrait permettre de prendre en charge 300 000 m³ de déchets supplémentaires et d'exploiter le Cires jusqu'à l'horizon 2045
- **Évaluation du volume supplémentaire de déchets TFA produits par six réacteurs EPR2** : 120 000 m³

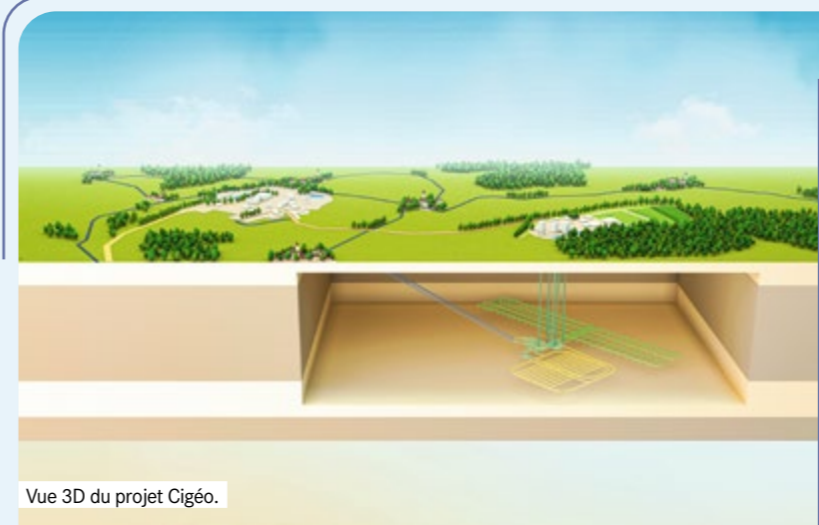
DÉCHETS FMA-VC

Depuis 1992, c'est au Centre de stockage de l'Aube (CSA) que sont pris en charge par l'Andra les déchets FMA-VC.

- **Capacité de stockage autorisée du CSA** : 1 000 000 m³
- **Taux de remplissage à fin 2023** : 37,9 %. Selon les estimations actuelles, uniquement basées sur les volumes produits par les installations nucléaires déjà autorisées, le CSA devrait atteindre sa capacité maximale autorisée à l'horizon 2060
- **Évaluation du volume supplémentaire de déchets FMA-VC produits par six réacteurs EPR2** : 98 400 m³



Stockage de déchets FMA-VC au CSA.



Vue 3D du projet Cigéo.

DÉCHETS MA-VL ET HA

Si le projet de Centre de stockage géologique, Cigéo, est autorisé, il pourra prendre en charge les déchets MA-VL (à l'horizon 2040) et HA (à l'horizon 2080).

Par ailleurs, si la création des six nouveaux réacteurs est autorisée, des études complémentaires devront être menées pour conforter l'évaluation préliminaire de l'Andra. Leur prise en charge par Cigéo nécessitera également de respecter les processus réglementaires et démocratiques préalables à l'autorisation de stockage.

- **Inventaire de référence de Cigéo** : 73 000 m³ de déchets MA-VL et 10 000 m³ de déchets HA
- **Évaluation du volume supplémentaire de déchets MA-VL et HA produits par six réacteurs EPR2** : les volumes varient sensiblement de quelques milliers de m³ selon la stratégie de retraitement des combustibles nucléaires usés (arrêt du retraitement, stratégie de mono ou de multi-recyclage) : pour les déchets MA-VL, les volumes varient entre 2 574 m³ et 3 951 m³; pour les déchets HA, les volumes varient entre 0 m³ et 1 872 m³

QUID DES PROJETS DE PETITS RÉACTEURS NUCLÉAIRES INNOVANTS ?

L'exploitation et le démantèlement des réacteurs nucléaires modulaires de petites tailles, dits SMR (*Small Modular Reactors*) ou AMR (*Advanced Modular Reactors*) en projet, produiront des déchets radioactifs. L'Andra regarde ce sujet de près, afin notamment d'accompagner les porteurs de projet qui doivent

fournir les données nécessaires pour permettre l'identification des filières de gestion des déchets produits par ces installations (caractéristiques, volume des déchets). Les échanges permettront aux futurs producteurs de déchets de mettre en place la caractérisation de leurs déchets.

Terres « Bayard », l'heure du dernier voyage

Après un siècle de succès, l'aventure des Réveils Bayard s'est arrêtée en 1988, laissant derrière elle un site contaminé. Des terres très faiblement radioactives provenant de cette friche industrielle sont aujourd'hui prises en charge sur l'un des centres de stockage de l'Andra dans l'Aube.

Revenons un siècle en arrière... Comme la plupart de ses concurrents à l'époque, la société Réveils Bayard a pris sa part à la folle histoire du radium. Découvert en 1898 par Marie et Pierre Curie, ce métal n'a pas seulement la propriété d'être radioactif : associé à certains matériaux, il devient luminescent⁽¹⁾. L'industrie horlogère se saisit de cette propriété et commence à utiliser de la peinture au radium sur les chiffres et les aiguilles des montres, des réveils et des pendules. Entrevoyant le potentiel de cette technologie, la société Réveils Bayard lance ses réveils en 1907. Dans les années 1930, elle obtient même d'un jeune réalisateur nommé Walt Disney le droit d'utiliser ses personnages pour créer des réveils animés. Plusieurs générations grandiront ainsi avec un Mickey Mouse, une Blanche Neige ou un Pluto « Bayard » sur leur table de nuit. Au pic de son activité, dans les années 1950 et 1960, la société emploie un millier de personnes. Son site de Saint-Nicolas-d'Alhiermont (Seine-Maritime) s'étend sur près

de 4 ha. À la fin des années 1970, l'arrivée du quartz et de la concurrence asiatique enclenche son déclin. Malgré l'engagement de plusieurs repreneurs, l'aventure prend fin.

1 500 tonnes de terres contaminées

À cette époque, l'utilisation du radium dans les produits de consommation courante et médicaux (pour ses vertus réputées curatives) est déjà terminée depuis deux décennies. La communauté scientifique prend progressivement conscience de sa dangerosité, et son usage se voit ensuite largement proscrit. Le radium disparaît des cadrans en 1962, remplacé par un autre radionucléide, le tritium. Ce dernier cède enfin la place au luminova, ni radioactif ni dangereux, en 1997. Après sa fermeture en 1988, le site de fabrication des Réveils Bayard de Saint-Nicolas-d'Alhiermont conserve les stigmates de son activité passée, notamment des terres contaminées. « L'Andra avait supervisé les premières opérations d'assainissement dans les années 1990, explique Jean-Baptiste Rioual, chargé d'affaires au service "Solutions pour les producteurs non électronucléaires". Mais, dans l'attente d'une filière pérenne de prise en charge de ces déchets radioactifs, la décision avait été prise de confier les 1 500 tonnes de terres excavées au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), à Cadarache (Bouches-du-Rhône), pour un entreposage provisoire. Les déchets radioactifs, majoritairement de très faible activité (TFA), ont été conditionnés dans 71 conteneurs. »



Ouvrières au travail à l'usine Bayard.

Le scandale des « radium girls »

Grâce à la protection opérée par la vitre du réveil ou de la montre, et du fait de leur très faible quantité, le radium ou le tritium ne présentent pas de risque pour leur détenteur (tant que la vitre reste intacte). Toutefois, leur utilisation par l'industrie horlogère est au cœur d'un des plus importants scandales sanitaires du début du xx^e siècle, aux États-Unis : celui des « radium girls ». Surnommées ainsi car il s'agissait majoritairement de femmes, elles avaient conservé cette habitude des peintres d'affiner à la bouche la pointe de leur pinceau. Leurs anémies, nécroses de la mâchoire et cancers finirent par être reconnus comme maladies professionnelles à la fin des années 1920. Le scandale des « radium girls » a eu un fort écho en Europe à l'époque et a entraîné enfin d'indispensables précautions.

Un chantier de longue haleine

Après un quart de siècle, les conteneurs, entreposés sous des hangars métalliques, commencent à rouiller. Toutefois, le Cires était désormais prêt à les prendre en charge, moyennant un reconditionnement. Un chantier pilote a donc été lancé sur 17 conteneurs de déchets TFA en 2020. Retardé par la découverte d'amiante dans les terres, le chantier a finalement permis à 17 conteneurs de déchets TFA d'être reconditionnés en 300 colis de déchets TFA et 1 colis de déchets de faible activité à vie longue (FA-VL). Les premiers ont été livrés au Cires en 2023 pour y être stockés définitivement. Quant au colis FA-VL, il a été entreposé temporairement dans une installation prévue à cet effet au Cires, sous surveillance,

dans l'attente d'une solution de gestion adaptée pour cette catégorie de déchets radioactifs. « Il reste désormais à reconditionner les 54 conteneurs de terre restants, soit l'équivalent d'environ 900 colis TFA, avant leur expédition au Cires pour y être stockés », annonce Jean-Baptiste Rioual. Sur le site de Saint-Nicolas-d'Alhiermont, l'histoire de la société Réveils Bayard s'est refermée avec la fin du chantier d'assainissement, il y a une dizaine d'années, et la déconstruction de l'ensemble des bâtiments de l'usine. Les lieux sont aujourd'hui entièrement réhabilités en espaces publics. ●

(1) C'est-à-dire qu'il émet de la lumière dans l'obscurité sans qu'il soit nécessaire de l'exposer à la lumière naturelle.



Terres excavées de l'usine Bayard entreposées en conteneurs à Cadarache.



Que faire de vos objets au radium ?

Les objets radioactifs, tels que les réveils avec de la peinture au radium, peuvent se reconnaître à la présence du symbole en forme de « trèfle » (ou trisecteur) sur leur emballage ou des lettres « rad » ou « ra » dans leur nom. Leur particularité ? Ils brillent dans l'obscurité sans avoir été exposés à la lumière depuis au moins deux jours. Ils peuvent aussi être conditionnés dans du béton ou du plomb. L'Andra est chargée de les récupérer, le plus souvent gratuitement. Elle collecte ainsi chaque année une centaine d'objets radioactifs contenant notamment du radium.

Contact : 01 46 11 83 27 ou collecte-dechets@andra.fr



Cadrans et aiguilles de réveil peints au radium



Pour en savoir plus sur la collecte des objets radioactifs : <https://vu.fr/UHVva>



Chantier de dépollution de l'usine Bayard à Saint-Nicolas-d'Alhiermont.

INTERNATIONAL

Gestion des déchets radioactifs : l'Espagne affine ses choix

Le septième plan général des déchets radioactifs (PGRR⁽¹⁾) publié en décembre 2023 par l'Espagne prévoit la poursuite du fonctionnement du centre de stockage en surface et avance vers la mise en œuvre d'un stockage géologique des déchets les plus radioactifs.



Vue aérienne de l'installation de stockage de déchets radioactifs d'El Cabril.

Ce plan intervient dans un contexte de sortie progressive de la filière électronucléaire : aujourd'hui, sept réacteurs demeurent en activité en Espagne dans les centrales d'Almaraz, Ascó, Cofrentes, Trillo et Vandellós. Leurs fermetures sont programmées entre 2027 et 2035 selon le nouveau PGRR. Leurs démantèlements s'ajouteront à ceux, en cours, de trois autres réacteurs déjà arrêtés.

El Cabril, un stockage en surface de référence

Ces démantèlements produiront un volume important de déchets radioactifs qui seront stockés sur le centre de stockage en surface espagnol d'El Cabril (près de Cordoue). Ouverte en 1992, cette installation accueille les déchets de faible et moyenne activité (FMA) provenant des installations nucléaires du pays et d'autres activités industrielles, médicales ou de recherche. Elle dispose également d'une zone pour les déchets de très faible activité (TFA). Son activité se poursuivra jusqu'à la fin du démantèlement du parc nucléaire espagnol. Un espace de stockage supplémentaire sera toutefois nécessaire vers fin 2028 pour la gestion des déchets FMA.

Vers le stockage géologique profond

La principale nouveauté de ce septième PGRR est la confirmation de l'abandon du projet de site d'entreposage temporaire centralisé pour les déchets de haute activité (HA) et les combustibles nucléaires usés⁽²⁾. Ils seront entreposés pendant plusieurs décennies sur leurs sites de production jusqu'à la mise en service d'une solution de gestion définitive : une installation de stockage géologique qui pourrait voir le jour vers les années 2070. Le PGRR établit une feuille de route détaillée pour le choix du site et la bonne information du public. Sur ce projet, l'Espagne peut s'appuyer sur les études sur le potentiel géologique du sous-sol ibérique, qui ont commencé en 1985 et révèlent la présence de formations potentiellement favorables. Plusieurs modèles conceptuels visant à démontrer la sûreté d'une solution de ce type ont déjà été développés et évalués. ●

⁽¹⁾ Plan general de residuos radiactivos. Ce document définit la stratégie et les actions à mettre en œuvre pour assurer une gestion sûre et adaptée des déchets radioactifs.

⁽²⁾ Contrairement à la France, l'Espagne ne retire plus son combustible usé depuis 1983. Il est donc considéré comme un déchet radioactif en tant que tel.

France-Espagne, une coopération active

Gestion opérationnelle des déchets, R&D, dialogue avec les communautés locales : la coopération entre l'Andra et l'Enresa, son homologue espagnol, ne s'est jamais interrompue depuis un premier accord en 1986. Début juin 2023, une délégation de l'Enresa était ainsi reçue au Centre de stockage de l'Aube (CSA) puis au Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) pour travailler sur la thématique de la surveillance dans les ouvrages de stockage d'El Cabril.



Stockage des déchets de faible et moyenne activité à El Cabril.

Cigéfix, un chien-robot en quête d'autonomie

L'Andra a fait l'acquisition d'un robot quadrupède Spot développé par Boston Dynamics. Rebaptisé Cigéfix, ce robot tout-terrain est testé au Laboratoire souterrain du Centre de Meuse/Haute-Marne.

De SCAR à Cigéfix

Le premier robot de la gamme Spot (de Boston Dynamics) à arpenter les galeries du Laboratoire souterrain de l'Andra s'appelait Scar. Il a été acquis en 2020 par l'École des mines de Nancy, avec laquelle l'Andra a créé la chaire de recherche « Intelligence artificielle pour applications robotiques en environnements complexes ». Capitalisant sur ces premiers travaux, l'Andra souhaite à présent utiliser Cigéfix pour préfigurer des applications possibles de la robotique autonome et accompagner ses recherches sur l'intelligence artificielle, les capteurs embarqués, la navigation en milieu souterrain, etc., en vue de Cigéo.

Essais prévus en 2024

Cigéfix sera testé au cours de six campagnes d'essais en 2024. Parmi ses missions : arpenter les galeries pour cartographier les différents équipements (sécurité, etc.) présents, mais aussi aller inspecter un front de taille en creusement, ou encore observer la convergence des parois des galeries en mesurant, par laser ou LiDAR, les variations de leur diamètre. Autant de missions préfigurant des futures tâches de la robotique autonome dans Cigéo !

En route vers l'autonomie

L'un des principaux enjeux de ces essais est de permettre à Cigéfix de se déplacer de manière autonome, sans communication avec un opérateur. Pour l'instant, il peut être programmé ou se repérer à l'aide de « tags », sortes de QR codes placés dans les galeries. Mais l'Andra souhaite qu'il soit capable de déchiffrer la signalétique générale des galeries (chiffres et codes apposés sur les parois à destination des humains) afin de s'orienter tout seul. Il pourrait ainsi, à terme, être envoyé en reconnaissance en cas d'incident. Avec ses appareils photos, LiDAR et caméras embarqués, il pourrait aussi documenter la réalisation de Cigéo et même fournir les données nécessaires à l'élaboration de jumeaux numériques.



Pour en savoir plus sur le robot-chien, voir la vidéo : <https://vu.fr/qUKNs>



#ON VOUS RÉPOND

Qu'y a-t-il dans les déchets radioactifs de haute activité ?

Les déchets radioactifs de haute activité, ou déchets HA, ne représentent que 0,2 % du volume total des déchets radioactifs produits par l'industrie nucléaire, mais ils sont très dangereux, car ils concentrent 97,2 % de leur radioactivité.

Ils proviennent du combustible utilisé, après son utilisation dans le cœur des réacteurs nucléaires. Les déchets HA constituent 4 % de ce dernier, le reste étant des matières valorisables extraites lors des opérations de retraitement.

Ces déchets sont majoritairement composés de produits de fission, c'est-à-dire d'atomes radioactifs résultant de la fission des atomes d'uranium 235. Leur décroissance radioactive varie selon les éléments, d'une seconde à des milliers d'années. Pris dans leur ensemble, ils rejoignent le niveau de radioactivité du minerai d'uranium en quelques centaines d'années.

En plus des produits de fission, on trouve dans les déchets HA des actinides mineurs en quantités très réduites. Ils sont issus des atomes d'uranium qui ont capturé des neutrons. Plus lourds et moins mobiles que les produits de fission, les actinides mineurs sont plus aisés à confiner dans un lieu défini. Mais leur décroissance radioactive est généralement très longue et certains peuvent

rester dangereux pendant plusieurs centaines de milliers d'années.

Actuellement, les déchets HA sont piégés dans du verre puis coulés dans des conteneurs en acier inoxydable, avant d'être entreposés provisoirement à l'usine Orano La Hague (voir page 11). Dans le futur, ils rejoindront Cigéo, s'il est autorisé, pour un stockage définitif en grande profondeur.



Usine Orano La Hague.

#ILS SONT VENUS NOUS VOIR



José Miguel Jimenez, responsable du département technologie au CERN*.

Visite du Laboratoire souterrain du Centre de Meuse/Haute-Marne le 5 avril 2024.

« Le Laboratoire est une très belle curiosité technique. J'ai été particulièrement impressionné par votre rigueur et la méthodologie que vous développez. Au CERN, nous avons environ 80 km de galeries, moins équipées, car nous avons des finalités et des enjeux différents. Ce que vous faites nous intéresse énormément, c'était très instructif ! »

* Organisation européenne pour la recherche nucléaire, basée à proximité de Genève.

Vous aussi, vous souhaitez mieux comprendre la gestion des déchets radioactifs ?

Contactez-nous au **03.29.75.53.73** ou par mail à **visite.55.52@andra.fr**

PHOTOMYSTÈRE



À votre avis que représente cette image ?

Il s'agit de démonstrateurs de conteneurs de stockage pour les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL), exposés dans l'espace technologique du Centre de Meuse/Haute-Marne. Au premier plan, les angles endommagés sont le résultat d'un essai de chute visant à démontrer la résistance du béton. À l'arrière-plan, on distingue un essai de gerbage qui vise à évaluer le comportement du béton sur le long terme.

Pour en savoir plus, rendez-nous visite ! <https://vu.fr/zVsJ>



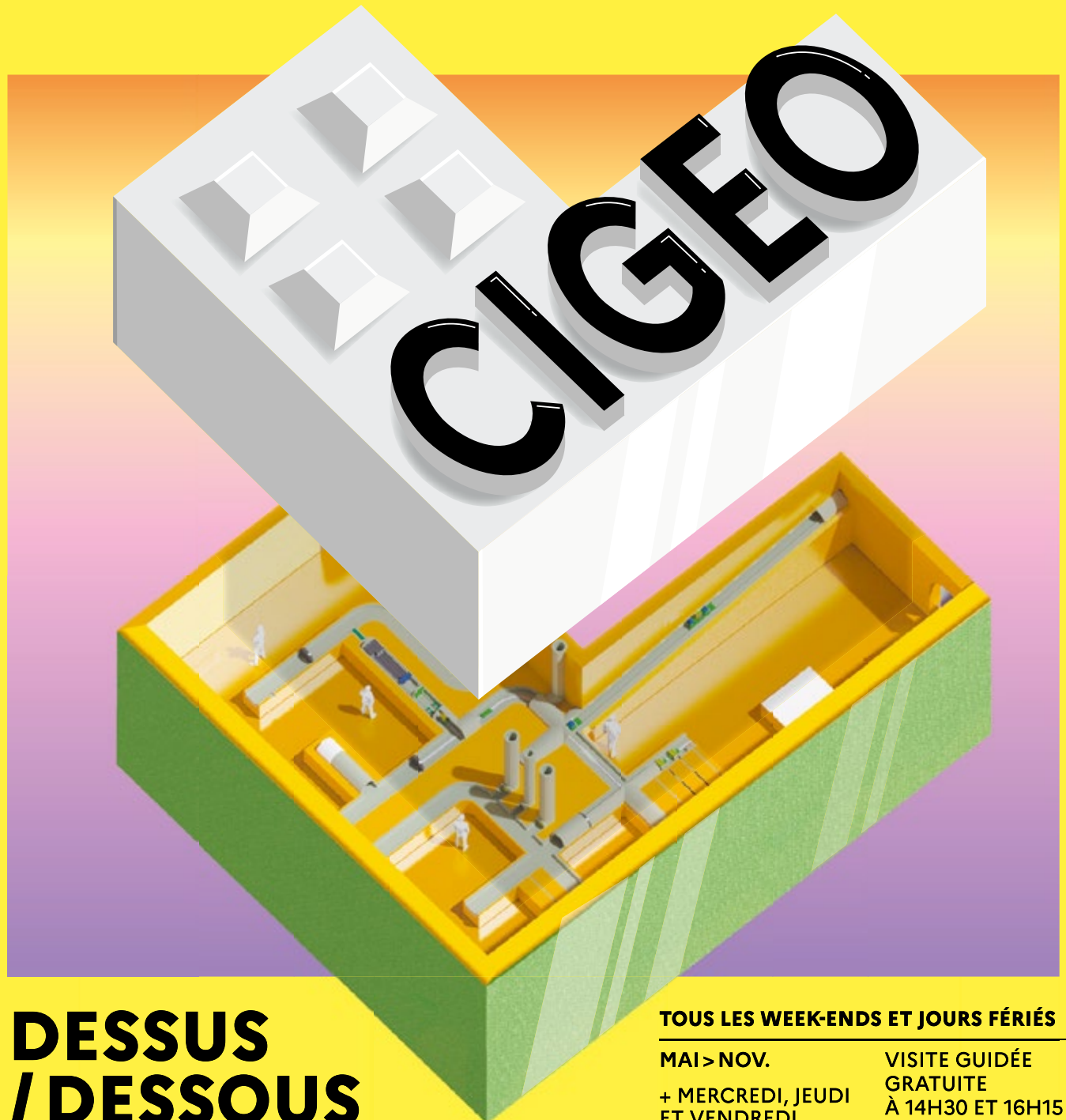


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



EXPOSITION



DESSUS / DESSOUS

Plongez dans la maquette
du projet CIGÉO

TOUS LES WEEK-ENDS ET JOURS FÉRIÉS

MAI > NOV.

+ MERCREDI, JEUDI
ET VENDREDI
JUILLET > AOÛT

VISITE GUIDÉE
GRATUITE
À 14H30 ET 16H15

Q Espace technologique
Centre de Meuse/Haute-Marne
RD960 55290 Bure

03 29 75 53 73
visite.55.52@andra.fr
meusehautemarne.andra.fr

Sans rendez-vous
Pièce d'identité
obligatoire pour les adultes