



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

REPÈRES

EN PRATIQUE

Le retour d'expérience
améliore-t-il la sûreté ?

REPORTAGE

Des expériences en béton
sur la plateforme Lutèce

DOSSIER

Médicaments
radiopharmaceutiques
Produire et transporter en sûreté



La trajectoire d'un polluant radioactif

Quels sont le trajet et le devenir d'un polluant radioactif depuis un fleuve jusqu'à la mer ? Vous le comprendrez en écoutant le cinquième épisode de la série de podcasts IRSN « Ma thèse en connaît un rayon ». Adrien Delaval, doctorant spécialisé en environnement, explique avec pédagogie ses recherches et les enjeux sanitaires. www.irsn.fr/R49

Grossesse et exposition aux rayonnements

Quelles sont les doses à risque pour les femmes enceintes exposées aux rayonnements comme patientes ou dans le cadre de leur travail ? Quels sont les effets

de l'irradiation *in utero* ? Quelle est la réglementation et les protections radiologiques ? Une nouvelle fiche d'information est destinée aux médecins du travail, chargés de radioprotection, professionnelles exposées, etc. www.irsn.fr/Grossesse-RI-patients



En ligne : le bilan des expositions professionnelles

Le bilan 2020 des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants est consultable sur irsn.fr. On y apprend que la dose individuelle moyenne est en baisse de 35 %, un phénomène lié à la situation sanitaire due à la Covid-19. Une version numérique

et interactive permet de télécharger les données et de les réutiliser selon son besoin. expro.irsn.fr



Un nouveau constat radiologique

Quels sont les niveaux de radioactivité naturelle et artificielle en Normandie et dans les Hauts-de-France ? Ce territoire est caractérisé par la présence de quatre centrales nucléaires et d'une usine de retraitement du combustible usé. Toutes les réponses sont dans le rapport de synthèse téléchargeable sur irsn.fr. Il intègre les demandes des acteurs locaux. www.irsn.fr/Constat-Normandie-HdF-2021

Agenda

Agenda sous réserve de la tenue des événements, en raison de la crise liée à la Covid-19.

22 et 23 novembre 2021

Paris (Île-de-France)

Eurosafe 2021

« La sûreté nucléaire et la radioprotection dans un monde perturbé », c'est le thème de la prochaine édition d'Eurosafe. Cette conférence internationale porte sur la sûreté et la sécurité nucléaires, la gestion des déchets radioactifs et la protection radiologique. La pandémie de Covid-19 et les menaces liées au changement climatique créent de nouveaux risques et des défis. Venez en parler avec les experts lors de séminaires techniques et des tables rondes.

www.etsn.eu/eurosafe

24 novembre 2021

Montrouge (Hauts-de-Seine)

Colloque « S'adapter à l'imprévu »

Comment faire face à l'imprévu pendant une crise ? Comment le prendre en compte dès la conception d'une centrale ? Les sciences humaines et sociales apportent des réponses. Découvrez leurs recherches engagées après l'accident de Fukushima Daiichi et les enseignements tirés.

www.irsn.fr/fuku2021

Contact : fukushima2021@irsn.fr



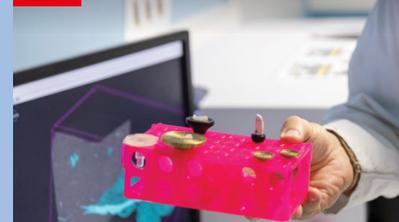
Online WEBMAG

www.irsn.fr/R51



À LIRE
Dossier
Comment maîtriser les risques lors du transport ?

DIAPORAMA



Reportage
Repérer des espèces cristallines

Abonnement

POUR VOUS ABONNER

www.irsn.fr

Rubrique l'IRSN > Publications > Magazine Repères

Sommaire

En couverture : Bich Thuy Nguyen (de face) et Aurélie Merle-Szérémeta (de dos), expertes en sûreté des transports, discutent d'un colis utilisé au cours de la fabrication des médicaments radiopharmaceutiques.

P.4 TEMPS FORTS

Démantèlement de Brennilis
La maîtrise du risque d'incendie est expertisée

Étude à long terme du césium 137
Des forêts françaises sont échantillonnées



P.6 FAITS ET PERSPECTIVES

Surveillance de l'exposition aux rayonnements
La refonte du système Siseri se base sur les attentes des utilisateurs

P.9 ZOOM

Pleins feux sur la cellule

DOSSIER P.10

Dossier du prochain N° :
Générateurs de vapeur : quels risques et quelles expertises ?

Médicaments radiopharmaceutiques
Produire et transporter en sûreté

P.17 EN PRATIQUE

Sûreté
Les enseignements du Rex



P.20 INTÉRÊT PUBLIC

Risque radiologique : les citoyens s'impliquent

P.22 REPORTAGE

Lutèce
Des expériences en béton



© Noa/Le Bar Floréal/Médiathèque IRSN

Santé Expertise à 360°

En diagnostic, ou pour la thérapie, les médicaments radiopharmaceutiques sont utilisés plus d'un million de fois chaque année en France. Pour qu'ils parviennent au patient, il faut des usines du cycle du combustible, des réacteurs expérimentaux, de l'extraction des isotopes médicaux, du transport et enfin l'hôpital. Ces cinq domaines ont autant de cultures du risque et de la sûreté. Ceci fait de la santé un exemple emblématique de la transversalité de l'expertise de l'Institut.

Dans ce dossier, *Repères* s'arrête à la porte de l'hôpital et se consacre aux expertises et aux recherches déployées pour fabriquer le médicament et l'acheminer en sûreté. À l'intersection de l'ensemble des contributeurs de la création de ces médicaments – grands comme petits, avec des installations uniques –, l'IRSN est le seul à avoir une vision globale de la sûreté de ce processus. Il lui incombe de chercher des incohérences et des solutions d'amélioration, tout en tenant compte des pressions qui pèsent sur chacun des acteurs : s'agit-il d'une activité lourde ? Rare ? D'un petit exploitant disposant d'un faible retour d'expérience propre, etc. Une quinzaine d'unités de l'IRSN contribuent à ce travail complexe. Analyser des problèmes, les anticiper, conseiller... tout concourt à relever le niveau de la sûreté, et parfois de la radioprotection.

Igor Le Bars
Spécialiste de l'expertise de sûreté

REPÈRES – Éditeur : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - Membre d'Etson MEMBER OF **ETSON** – 31, avenue de la Division-Leclerc, 92260 Fontenay-aux-Roses – Tél. : 01 58 35 88 88 – Site Internet : www.irsn.fr – Courriel : reperes@irsn.fr – Directeur de la publication : Jean-Christophe Niel – Directrice de la communication : Marie Riet-Hucheloup – Rédactrice en chef : Catherine Roulleau – Assistante de rédaction : Isabelle Cussinet – Ont collaboré à ce numéro : Agnès Dumas, Octavia Véry, Pascale Monti – Comité de lecture : Louis-Michel Guillaume – Rédaction et réalisation, maquette et direction artistique : ABG Communication – Iconographie : Valérie Delchambre – Photos de couverture : © Florence Brochoire/Signatures/Médiathèque IRSN – Impression : Handiprint (50) – Imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement – ISSN : 2103-3811 et 2491-8776 (Web) – novembre 2021.

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Gestion post-accidentelle

Des pratiques communes sont mises en place

Si un accident nucléaire survenait, des prélèvements de denrées alimentaires seraient réalisés dans les territoires contaminés. Ceci afin de déterminer leur niveau de radioactivité et décider si elles peuvent être consommées. Pour que les préleveurs* adoptent en France des pratiques et des outils communs, les experts de l'Institut mettent à leur disposition une plaquette synthétisant les informations essentielles. Selon le type de denrées, elle précise les quantités à prélever, le matériel à employer... Ce document est utilisé dès mai dernier, lors de l'exercice majeur de crise, et sera largement diffusé aux préleveurs locaux. Il a été élaboré avec la Direction générale de l'alimentation (DGAL) et la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF), au sein d'un groupe de travail « crise » créé en 2018.

* Les préleveurs sont rattachés aux directions départementales de la protection des populations et aux directions régionales de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt.

www Pour en savoir plus : www.irsn.fr/prelevements

MÉDICAMENTS RADIOPHARMACEUTIQUES

31

cyclotrons

en France produisent des radionucléides pour la médecine nucléaire.

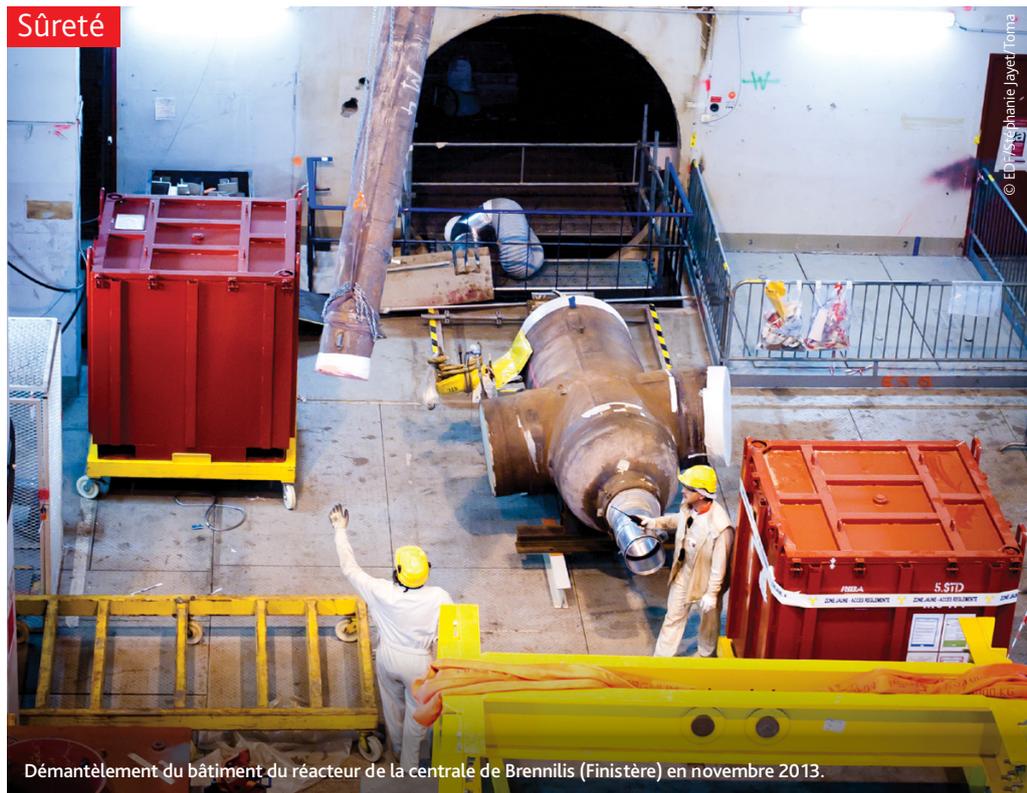
20

inspections

environ sont effectuées chaque année par des experts de l'IRSN sur des installations intervenant dans la production.

Retrouver le dossier « Médicaments radiopharmaceutiques » en page 10.

Sûreté



Démantèlement du bâtiment du réacteur de la centrale de Brennilis (Finistère) en novembre 2013.

Démantèlement de Brennilis

La maîtrise du risque d'incendie est expertisée

“ **E**n raison des différences technologiques¹ entre les centrales de Brennilis [Finistère] et de Fessenheim [Haut-Rhin], les dispositions techniques – démontage des équipements, découpe de la cuve... – sont peu transposables, affirment Fabien Dumay et Stanislas Massieux, experts en sûreté. Les dispositions organisationnelles – encadrement des prestataires ou gestion de la co-activité² – retenues par EDF pour Brennilis permettront de tirer des enseignements pour l'expertise du dossier de démantèlement de Fessenheim. »

La maîtrise du risque incendie, point majeur de la sûreté, a été très étudiée. Les découpes et équipements internes du cœur – tubes de force, barres de contrôle – ont fait l'objet d'un examen approfondi. L'IRSN émet aussi des recommandations concernant l'état final visé pour le démantèlement et les caractérisations de l'état des sols.

Le réacteur de la centrale de Brennilis est un prototype, arrêté depuis 1985. Le retrait du combustible, achevé en 1992, a éliminé la majorité des matières radioactives. Des opérations de démantèlement partiel ont été

réalisées entre 1997 et 2018. La demande de démantèlement complet, déposée par EDF en 2018, concerne les circuits de refroidissement, la cuve et ses équipements internes. Les principaux enjeux de radioprotection à ce stade proviennent des équipements métalliques encore présents dans les réacteurs irradiés.

1. À Brennilis, le réacteur est à eau lourde et refroidi par du gaz. À Fessenheim, il est à eau ordinaire sous pression.
2. Opérations faites simultanément dans la même zone par différentes équipes, nécessitant des équipements communs. C'est un facteur de risque important.

www Pour en savoir plus : www.irsn.fr/Avis-2021-23



Des agents en tenue de protection dans la zone à déchets nucléaires à Brennilis en 2013.

Santé



Image d'une coupe sagittale du cerveau d'un souriceau. La zone à irradier, le gyrus denté, est entourée en rouge.

1 mm

© Scanner SARRE/IRSN, IRM Université Paris Descartes

“ L'objectif des recherches est de mieux comprendre les conséquences des expositions sur le cerveau.

Cerveau et rayonnements

Une irradiation partielle affecte la mémoire spatiale

L'irradiation postnatale millimétrique d'une zone du cerveau – le gyrus denté¹ – peut altérer la mémoire spatiale de souris adultes. C'est ce que montrent les recherches de Céline Serrano, doctorante en physiologie et physiopathologie, au cours de sa thèse co-encadrée par l'IRSN et l'Institut des neurosciences de Paris-Saclay (Essonne). La relation dose-effet ne suit pas une relation linéaire. L'altération n'est pas observée lorsque l'organe est exposé dans son intégralité.

Ce travail a été mené dans le cadre du programme de recherche Scanner². Christelle Durand et Morgane Dos Santos, chercheuses en radiobiologie, neurobiologie et

physique à l'IRSN, évaluent chez l'animal les répercussions sur les processus cognitifs d'une exposition cérébrale juvénile aux rayonnements ionisants de moins de 2 Gy. Ces nouvelles données expérimentales alimenteront à terme le système de radio-protection de l'enfant.

1. Structure du cerveau située au niveau de l'hippocampe, impliquée dans la mémoire spatiale.
2. Study of consequences of postnatal brain exposure to IR : from gene to behaviour, « Étude des conséquences de l'exposition postnatale du cerveau aux rayonnements ionisants : du gène au comportement ».

www Pour en savoir plus :
 Dos Santos M. et al. (2018) Nature
 Serrano C. et al. (2021) Biology

Environnement



Dina Okhrimchuk et Marc-André Gonze, spécialistes de modélisation pour l'expertise environnementale, effectuent un prélèvement dans une forêt de Haguenau (Bas-Rhin).

Étude à long terme du césium 137

Des forêts françaises échantillonnées

À la suite de rejets radioactifs, comment évoluent les niveaux de césium dans les forêts ? Pour répondre à cette question, les scientifiques de l'IRSN disposent du modèle Tree4¹ qui calcule ces niveaux et prédit leur évolution. Il est développé à l'aide de données acquises sur les sites de Tchernobyl et de Fukushima. Pour le transposer au contexte français et consolider la modélisation sur le long terme – jusqu'à trente ans –, des prélèvements sont en cours. Trois sites forestiers de l'Hexagone² sont impliqués : un de hêtres (Pyrénées-Atlantiques), un de chênes (Seine-et-Marne) et un troisième de sapins (Isère).

Ces travaux sont au cœur de la thèse de Dina Okhrimchuk, doctorante en radioécologie, et du post-doctorat de la chimiste Marine Roulier. Ils s'inscrivent dans le cadre de Amorad II. Ce projet de recherche étudie le transfert du césium 137 vers le bois et les facteurs de variabilité observés sur seize sites représentatifs des écosystèmes français.

1. Transfer of radionuclides and external exposure in forest systems.
2. Collaboration avec l'Office national des forêts (ONF) au sein du Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (Renecofor).

www Pour en savoir plus :
www.irsn.fr/These-Okhrimchuk

Baromètre annuel 2021

La santé, première préoccupation des Français

Quelle est la principale préoccupation des Français ? La santé, révèle l'édition 2021 du baromètre IRSN sur la perception des risques et de la sécurité. Elle emporte 26 % des réponses, suivie par le terrorisme (19 %) et le dérèglement climatique (15 %). Cette enquête étudie l'évolution du positionnement de la société sur un large spectre de risques. C'est un outil pour les acteurs de la maîtrise des risques. Parmi les enseignements marquants : l'image de la science et des experts reste largement positive, bien qu'écornée par la pandémie. Si 61 % des Français font confiance aux institutions scientifiques, seuls 11 % ont une mauvaise opinion des experts. Sur les trente-et-un risques suivis, les trois perçus comme les plus élevés sont le terrorisme, le cancer et les pandémies. Les trois jugés les plus faibles sont – comme chaque année – les radiographies médicales, le radon et les accidents de radiothérapie. Pour la première fois, deux enquêtes sont menées en parallèle, l'une sur Internet, l'autre en face à face. L'échantillon représentatif est de 2 000 personnes, contre 1 000 les années précédentes.

www Pour en savoir plus :
www.barometre.irsn.fr

FAITS ET PERSPECTIVES



Dans cette unité de recherche à Caen (Calvados), chercheurs, ingénieurs et techniciens sont exposés au risque radiologique.



Les travailleurs utilisant un gammagraphe bénéficient d'un suivi dosimétrique, comme ici dans une aciérie en Haute-Marne.

Surveillance de l'exposition aux rayonnements

La refonte du système Siseri se base sur les attentes des utilisateurs

Des milliers de professionnels participent au suivi des 400 000 travailleurs exposés aux rayonnements ionisants. Le système d'information et de surveillance qu'ils utilisent va être refondu. Grâce à une démarche centrée utilisateur, il aspire à devenir le lieu unique pour renseigner et consulter des données.

Siseri – le Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants – centralise, vérifie et conserve l'ensemble des résultats des mesures individuelles de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants. Ces données sont ensuite restituées aux acteurs de la radioprotection, via Internet, afin d'optimiser la surveillance médicale et la radioprotection des travailleurs.

Siseri a été mis en place à la demande et avec le soutien de la Direction générale du travail (DGT).

En quinze ans d'existence, le système a régulièrement évolué pour intégrer les changements réglementaires et tenir compte des retours des utilisateurs. Néanmoins, une refonte est aujourd'hui indispensable.

Elle vise à simplifier l'outil, en facilitant notamment la saisie et l'accès aux informations. L'objectif est aussi de le rendre interopérable avec les systèmes d'information connexes de l'État ou d'opérateurs privés.

Médecin, employeurs, inspecteurs...

Une approche centrée utilisateur semble être la plus adaptée pour construire un outil qui réponde aux besoins de ces derniers.

« Mettre au cœur du projet de refonte les différentes communautés d'utilisateurs est essentiel pour construire collectivement un portail optimal et offrir aux principaux concernés un nouveau Siseri répondant à leurs besoins et attentes », témoigne Sulma Perez, cheffe de projet à la DGT.

Le projet de refonte débute en septembre 2021. L'équipe projet fait appel au laboratoire d'innovation de l'Institut – l'IRSN Lab – créé pour promouvoir et insuffler l'esprit d'innovation et mettre à profit les approches centrées utilisateur.

Dès la phase de préparation, les travaux sont structurés selon les principaux profils identifiés : médecins du travail, conseillers en radioprotection (CRP, anciennement personne compétente en radioprotection), inspecteurs, employeurs, organismes accrédités... L'objectif de cette segmentation est d'identifier les besoins propres à chacun et, *in fine*, de proposer des solutions pertinentes.

Les ateliers rassemblent d'abord l'équipe projet, composée d'experts de l'IRSN et de la DGT et d'un premier groupe d'utilisateurs. Ensemble, forts de leurs expériences respectives, ils identifient les besoins liés à leur fonction. Un médecin du travail a par exemple besoin des données de suivi disponibles dans le Siseri actuel : celui périodique de salariés prestataires, connus pour une grande mobilité professionnelle



Suivi médical du personnel exposé à la centrale de Paluel (Seine-Maritime).

et géographique. Il doit disposer du suivi des agents statutaires jusqu'à leur retraite, avec une visite en fin de carrière et un bilan dosimétrique destiné au médecin traitant en charge du suivi post-professionnel. Siseri est aussi un support pour la prévention et l'optimisation en matière de radioprotection. « C'est un instrument fiable et exhaustif. Il me permet de remplir l'ensemble de mes missions dans les différents domaines de la dosimétrie. Je peux échanger avec mes interlocuteurs sur la prévention et l'optimisation en matière de radioprotection. Je l'utilise quotidiennement », témoigne le docteur Colinmaire, médecin du travail pour EDF à la centrale du Blayais (Gironde).

Un deuxième groupe d'utilisateurs

Sur cette base, les utilisateurs imaginent les réponses que la nouvelle version du Siseri pourrait apporter. La disparition du protocole d'accès sécurisé (Pass) à Siseri, avec la création d'un profil employeur dans le système, suscite l'adhésion. Même réaction pour la consultation des statistiques globales d'exposition d'une entreprise par les médecins du travail et les CRP.

Les réflexions avancent vite grâce au travail avec un groupe restreint. Il importe toutefois de vérifier les idées construites. Une seconde étape consiste à les tester auprès de groupes plus importants, d'une dizaine d'utilisateurs par profil. Ces sessions de tests sont portées par l'équipe projet, après une préparation avec l'IRSN Lab. « Près d'une vingtaine de sessions sont organisées, raconte Hervé Roy, chef de projet à l'IRSN. L'objectif est d'améliorer collectivement le prototype déclinant les premières idées. Par exemple, les inspecteurs ont proposé d'ajouter des champs pour faciliter la recherche des résultats dosimétriques. Nous avons suggéré de désigner des ambassadeurs pour

PROCESS

OpenRadiation : l'approche centrée utilisateur pour mieux répondre aux usagers

Faire ses propres mesures de la radioactivité, c'est possible avec le dispositif OpenRadiation. Pour son nouveau site internet, les attentes des utilisateurs sont mieux cernées grâce à un atelier de conception créative, avec l'appui de l'IRSN Lab.

1 Le site d'OpenRadiation¹ doit évoluer pour mieux impliquer les utilisateurs. Ses concepteurs sollicitent l'IRSN Lab².

Nous voulons un site internet qui stimule l'intérêt et l'implication des utilisateurs.



2 Un atelier de conception créative³ est organisé avec les partenaires⁴, ainsi que des citoyens, des membres de commissions locales d'information (CLI), des enseignants, etc.



Qui utilise OpenRadiation ?

3 Trois profils d'utilisateurs sont sélectionnés

<p>A Lycéen</p> <p>« Je veux assembler mon propre kit et faire des mesures seul. »</p>	<p>B Enseignante</p> <p>« Je recherche des connaissances dans un but pédagogique. »</p>	<p>C Citoyen</p> <p>« Je suis vigilant et je veux lever un doute. »</p>
---	--	--

4 Les utilisateurs sont personnalisés et leurs besoins définis

Exemple : Claude, retraité (profil citoyen)

Riverain de la centrale de Gravelines (Nord), il a suivi l'accident de Tchernobyl. Méfiant, il est investi dans des associations environnementales.



Ses attentes
Faire des mesures lui-même pour les comparer avec des données de référence, les partager avec la communauté, etc.

Ses freins
Comprendre les mesures et les moyens requis, rencontrer des utilisateurs locaux, etc.

Son idéal
Créer un nouveau réseau, se sentir acteur, voir les mesures des autres, etc.

5 Une solution est prototypée

Rendez-vous pour le nouveau site en 2022.

Future utilisatrice



- Événements régionaux, réseaux locaux...
- Site personnalisé
- Plateforme d'assistance

1. OpenRadiation est un projet open source et open data de science participative.
2. L'IRSN Lab est un laboratoire d'innovation créé en 2020.
3. La conception créative ou le *design thinking* est une approche de l'innovation centrée sur l'humain.

4. L'IFFO-RME (Institut français des formateurs risques majeurs et protection de l'environnement), l'IRSN, Planète Sciences, le FabLab de Sorbonne Universités et l'Anclli (Association nationale des Cli).

FAITS ET PERSPECTIVES

chacun des groupes : médecin du travail, CRP, employeur... Leur mission est d'assister l'équipe projet lors de la phase de tests du nouveau système d'information Siseri. »

« Les chefs de projet sont très attentifs aux demandes des médecins participants, observe le docteur Colinmaire. Avec un collègue, nous nous sommes portés volontaires pour être ambassadeurs du groupe "médecin du travail". Notre rôle consiste à consigner et à signaler les remarques et attentes des confrères, à tester durant le développement les versions bêta. J'ai hâte de les découvrir. »

Des fonctionnalités rêvées

Parallèlement, l'équipe projet a construit les premières maquettes de l'interface du prochain Siseri. Les fonctionnalités sont réparties entre les écrans, selon les besoins des différents profils. Pas à pas, le parcours des utilisateurs se construit, depuis leur connexion simplifiée jusqu'à l'accès aux informations détaillées utiles. Un tableau de bord offre une vue générale et les informations essentielles à chaque profil. Ces maquettes jouent le rôle de prototype.

Le prototype est un outil central dans une démarche centrée utilisateur. Il constitue un support pour tester les solutions envisagées auprès des utilisateurs, avant même de lancer le développement. Afin de collecter plus largement leurs attentes et de connaître les fonctionnalités qu'ils « rêvent » de voir dans le nouveau Siseri, l'équipe projet a lancé une enquête de satisfaction au printemps 2021. Les réponses confirment les solutions déjà imaginées. Ces échanges réguliers avec les utilisateurs nourrissent l'équipe projet tout au long du processus de refonte. L'objectif n'est jamais perdu de vue : créer un Siseri utile, utilisable et utilisé.

Le développement débute en mars 2021, selon le mode « agile* ». Une première version doit voir le jour d'ici le milieu de l'année prochaine.

Rendez-vous fin 2022 pour un nouveau Siseri au service de ses utilisateurs. ■

** En ingénierie logicielle, la pratique agile implique la collaboration entre des équipes auto-organisées et pluridisciplinaires et leurs clients. Le cadre méthodologique est léger, centré sur l'humain et la communication.*

www Pour en savoir plus :
Siseri : Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants
<https://siseri.irsn.fr/>

Qu'est-ce qu'une démarche centrée utilisateur ?

Cette démarche permet de créer ou d'améliorer un service en partant des besoins des utilisateurs. Si avant d'imaginer vos solutions, vous les écoutez, les observez et notez leurs difficultés, vous pourrez trouver des solutions qui améliorent leur expérience de votre service. Modifié selon ces retours, il sera utilisé, démontrant qu'il est utile !

Quand l'adopter ?

Dès lors qu'un projet propose un service destiné à

des personnes. Cette démarche s'applique tant aux usagers d'un service public qu'aux clients d'un produit manufacturé. Issue de l'innovation numérique, elle est évidemment pertinente pour les utilisateurs d'un site internet ou d'un logiciel.

Quel est le rôle de l'IRSN Lab ?

L'IRSN Lab est un outil dont peuvent s'emparer les chefs de projet, les salariés et les managers de l'Institut. Nous les accompagnons avec des méthodes du monde de l'innovation, telle la démarche centrée utilisateur.

Avec l'équipe projet et un panel d'utilisateurs, nous pouvons définir les différents profils d'utilisateurs, explorer leurs besoins et imaginer les solutions. Nous savons élaborer des prototypes, pour confirmer ou invalider des solutions avant de les développer. Les projets peuvent avoir des finalités externes et internes. La facilitation proposée par l'IRSN Lab est très pertinente dans la recherche de solutions à des problèmes complexes que l'organisation ne parvient pas à résoudre avec ses processus habituels.

3 questions à...

Laurent Guimier

Responsable de l'IRSN Lab



© Noak/Le Bar Floreal/Médiathèque IRSN



Un échange entre les membres des Commissions locales d'information (Cli).

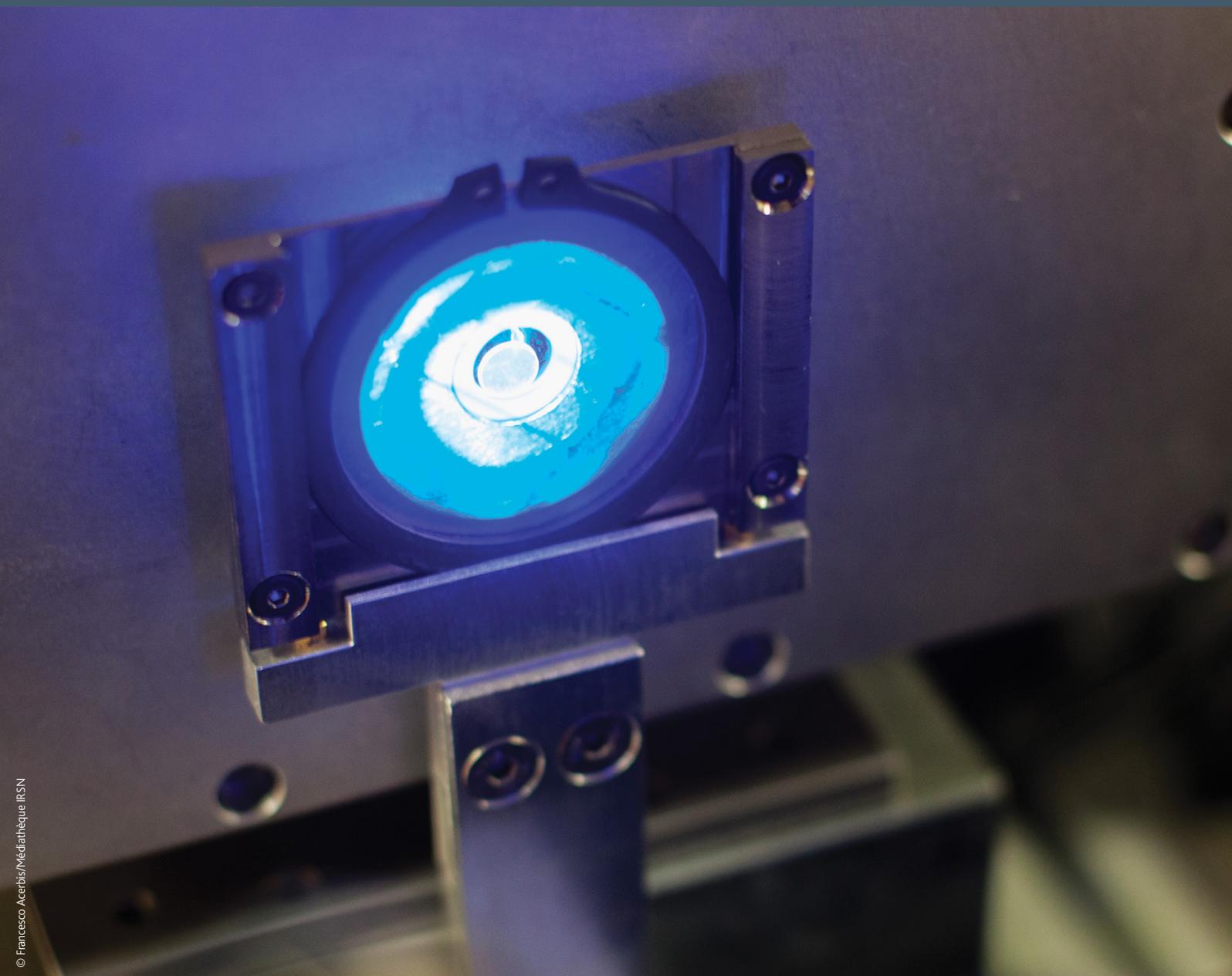
AILLEURS

Dégager les questions citoyennes

Les Commissions locales d'information (Cli) disposent généralement de peu de données sur les événements significatifs (ES) déclarés par les exploitants à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Ces informations sont pourtant importantes, afin que leurs membres exercent leur rôle de citoyens vigilants. Dès 2020, l'IRSN et l'Ancli* adoptent une démarche centrée utilisateur pour identifier des solutions permettant de mieux répondre à leurs attentes. En juin 2020, un premier atelier – inspiré d'une démarche de test utilisateur – collecte les questions des Cli face à un communiqué

succinct sur un ES. Celles-ci sont ensuite largement diffusées auprès de ces structures pour préciser l'avis général dégagé lors de cette première étape. Un second atelier, animé par l'IRSN Lab en groupe restreint, se concentre sur les besoins relevés, tels qu'une compréhension adaptée des ES. Les premières pistes de solutions esquissées pointent la nécessité d'une méthodologie pour suivre le traitement d'un ES et d'une collaboration des acteurs concernés. Les étapes suivantes doivent préciser ces solutions et évaluer leur faisabilité.

* Association nationale des comités et Cli.



Pleins feux sur la cellule

François
Vianna-Legros

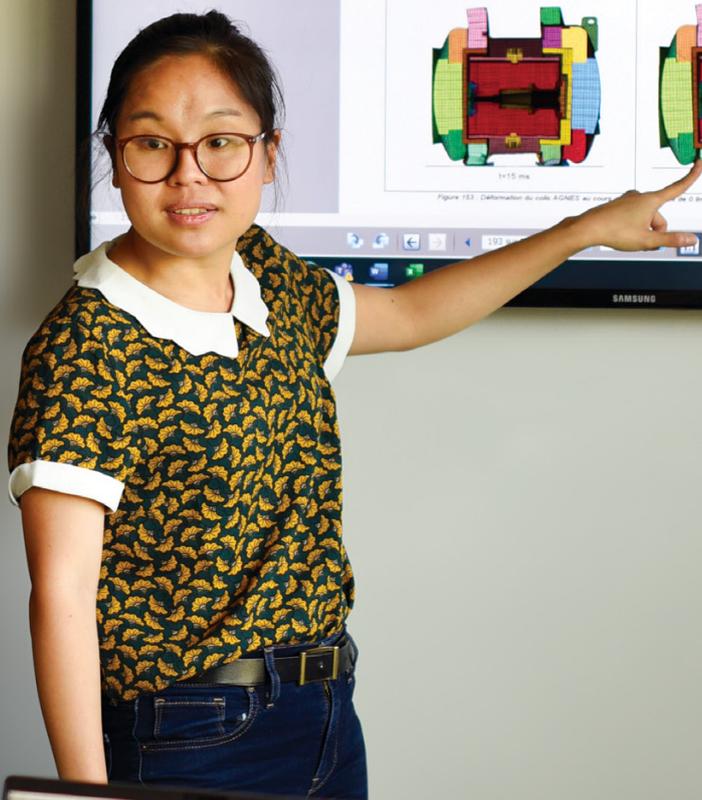
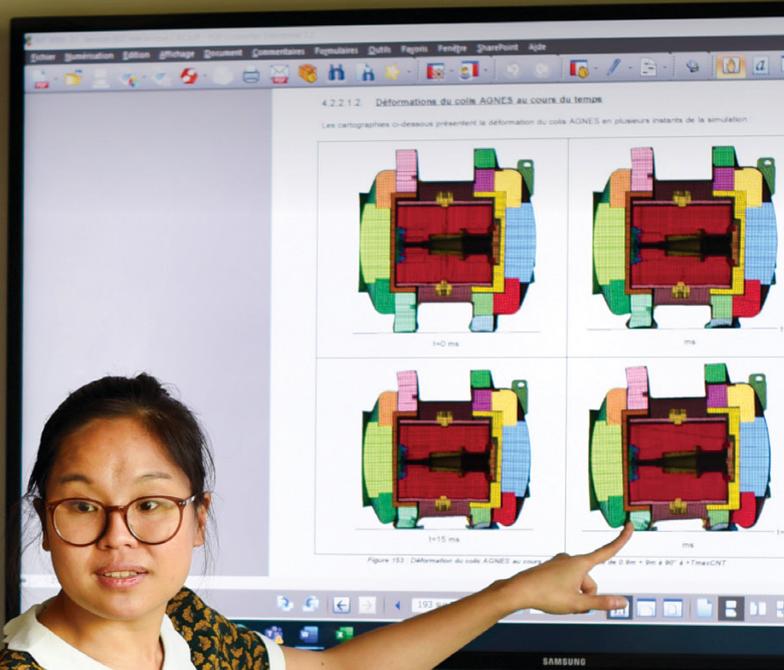
Chercheur en physique des particules

Vous croyez regarder la lampe d'un projecteur ? Nous ne sommes pas au cinéma. Ce qui est visé ici est le cœur d'une cellule du vivant. Cette photo montre un support sur lequel sont placées des cellules, installées devant un micro-faisceau d'ions qui les cible et les irradie. Sa grande précision permet d'atteindre leurs sous-structures, comme le noyau ou la mitochondrie, véritable centre énergétique cellulaire. Le faisceau délivre un nombre défini d'ions dans une zone micrométrique, afin de créer des dommages localisés.

Cette installation baptisée Mircom – pour « microfaisceau d'ions pour la radiobiologie aux échelles cellulaires et des organismes multicellulaires » – se situe au Laboratoire de micro-irradiation, de métrologie et de dosimétrie des neutrons (LMDN) à Cadarache (Bouches-du-Rhône). Ses domaines d'application sont variés : étude des effets secondaires des radiothérapies, des rayonnements cosmiques et des faibles doses. Des irradiations y sont réalisées avec des protons, des particules alpha et des ions carbone. Les recherches que l'IRSN mène

sur ce dispositif portent sur les mécanismes de réparation des lésions à l'ADN *in vitro* et sur le rôle de la mitochondrie dans les dommages radio-induits chez les vers nématodes. Elles alimentent le programme Rosiris lancé par l'IRSN pour identifier et prévenir les effets secondaires consécutifs à une radiothérapie.

Certains travaux menés sur Mircom sont conduits en collaboration avec le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS). ■



Bich Thuy Nguyen (de face) et Aurélie Merle-Szérémeta (de dos) sont expertes en sûreté des transports. Schéma à appui, elles échangent sur la déformation du colis Agnès en cas de chute. Celui-ci est utilisé pour le transport au cours de la production des médicaments radiopharmaceutiques.

300 000

colis de médicaments radiopharmaceutiques sont transportés chaque année en France. Il s'agit de produits de diagnostic et de sources pour la radiothérapie ou la curiethérapie.

Médicaments radiopharmaceutiques

Une production surveillée de près

La production de médicaments radiopharmaceutiques comporte plusieurs étapes réparties dans l'Hexagone. Leur fabrication et leur acheminement constituent un défi en terme de sûreté. Où sont-ils produits ? Comment sont-ils transportés ? Comment l'Institut suit-il les sites de fabrication et les transports ? Quelles recherches sont menées pour améliorer la sûreté ?



La caméra du TEM-TDM (tomographie par émission de positons-tomodensitométrie) requiert une source radioactive.

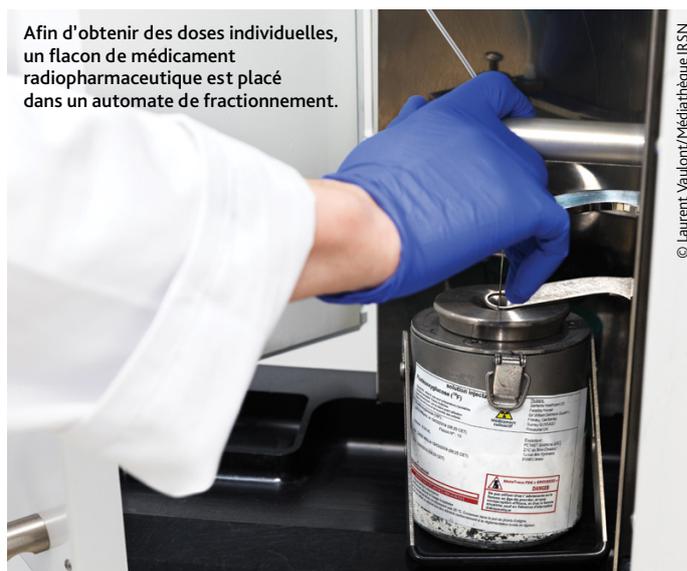


L'accélérateur Arronax à Nantes (Loire-Atlantique), est un cyclotron. Il délivre plusieurs types de particules – alpha, protons, deutons – employées pour la production de radio-isotopes et la recherche dans différents domaines.

Les médicaments radiopharmaceutiques contiennent une certaine activité de radionucléides. Les plus fréquents sont l'iode 131, le fluor 18 et le technétium 99m. Ils sont utilisés d'une part pour réaliser des diagnostics médicaux : le rayonnement détecté par des appareils d'imagerie aide à voir le fonctionnement du corps. D'autre part, ils servent pour des traitements, car le rayonnement détruit localement des cellules cancéreuses ou malades. La France compte deux-cent-trente-sept services de médecine nucléaire. Produits dans divers sites sur le territoire, les médicaments qu'ils utilisent font l'objet de nombreux acheminements. Dans ce dossier, *Repères* aborde la sûreté de la production et des transports.

Une production dispersée

Les médicaments radiopharmaceutiques doivent être utilisés rapidement, tout en limitant le risque radioactif à moyen terme. « Il s'agit de radionucléides, dont l'activité décroît rapidement. L'activité initiale doit donc être importante », explique l'experte en maîtrise des risques radiologiques et nucléaires, Siham Van Ryckeghem. Le carbone 11 perd la moitié de son activité en vingt minutes, le fluor 18 en 110. Ils doivent être employés peu de temps après leur fabrication. « Les installations de production sont généralement près des hôpitaux. Ceci explique leur répartition sur tout le territoire français et la nécessité d'un transport réactif », poursuit la spécialiste. La production des radionucléides est diversifiée. Elle a lieu dans deux types d'installations : dans un réacteur nucléaire de recherche – bombardement d'atomes par des neutrons – ou au sein d'un accélérateur de particules de type cyclotron. « Dans ce cas, des atomes sont bombardés avec les particules accélérées pour obtenir le radionucléide "fils" désiré », détaille Célian Michel, expert en radioprotection médicale. Certains médicaments radiopharmaceutiques sont obtenus au



“ La fabrication et les transports des médicaments radiopharmaceutiques doivent être réactifs.

sein même des hôpitaux, dans des laboratoires de préparation, à partir de la désintégration naturelle d'un radionucléide source. C'est le cas du technétium 99m – utilisé notamment pour la scintigraphie osseuse – obtenu à partir de son radionucléide « père », le molybdène 99.

Des risques d'exposition et de contamination existent « de la fabrication du radionucléide à son adjonction éventuelle à un vecteur », souligne l'expert. L'Institut expertise les installations de production de ces médicaments. « L'IRSN émet alors un rapport avec des recommandations techniques. Elles sont généralement reprises par l'Autorité [Autorité de sûreté nucléaire (ASN)] comme exigences vis-à-vis des exploitants », précise Siham Van Ryckeghem. Ces recommandations concernent par exemple les sécurités d'accès au local du cyclotron pendant et après l'irradiation ainsi que la limitation et la surveillance des rejets.

Maîtriser le risque incendie

Les experts sont impliqués depuis plus de dix ans dans le chantier emblématique de la sécurisation de l'usine de production de radioéléments artificiels, située à Saclay (Essonne). En 2010, il identifie un risque d'incendie non maîtrisé dans les bâtiments de ce site exploité par Cis bio international. Le risque radiologique est majeur : la tenue des installations au feu et les dispositifs de protection existants étant insuffisants.

À la suite des conclusions de l'IRSN et à la demande de l'ASN, l'industriel propose des dispositions de prévention et l'installation de systèmes d'extinction automatique. Pour évaluer la pertinence de

6 heures

C'est le temps de demi-vie du technétium 99m – principal radio-isotope utilisé pour les radiodiagnos- tics. Il est produit au sein des hôpitaux à partir du molybdène 99.

ces modifications, une expertise est réalisée par une quinzaine de spécialistes. « Nos investigations se basent sur des échanges avec l'exploitant, à partir de questionnaires, de réunions techniques, de visites régulières, de contre-calculs éventuels, afin d'évaluer le projet de remise à niveau », ajoute Paul Ros, expert en maîtrise des risques radiologiques et nucléaires.

Le projet proposé par l'industriel international et le suivi des travaux consécutifs sont évalués en 2012 et 2018 par l'IRSN. Mais « les éléments présentés nécessitent d'être complétés. Des travaux d'amélioration sont en cours. Le chantier de sécurisation se poursuit », mentionne-t-il.

Les procédures d'urgence à clarifier

En avril 2020, l'Institut est saisi à la suite d'un événement significatif survenu sur ce même site. Cis bio international signale le débordement d'une cuve d'effluents liquides contenant potentiellement un mélange de substances radioactives. « Comme ce n'était pas le premier incident de ce type, cela suggérait un problème récurrent dans l'organisation ou les procédés », se souvient Paul Ros.

Après examen du dossier, l'IRSN émet deux types de recommandations⁷. Les premières portent sur les dispositifs de gestion des effluents liquides. Elles préconisent l'utilisation de capteurs de niveau plus fiables et adaptés aux processus physico-chimiques se déroulant dans les cuves. Les secondes visent les facteurs organisationnels et humains. « Pendant l'incident, les premiers seuils d'alerte n'ont pas été signalés par les opérateurs. Il n'y a pas eu non plus de discussion entre les responsables de la production et un responsable sûreté. Ces défaillances montrent que les procédures d'urgence n'étaient pas claires ou pas respectées par le personnel », résume Paul Ros. Cela conduit l'industriel à compléter le projet en cours dédié à la gestion des effluents liquides de l'usine et à renforcer sa gestion des écarts.

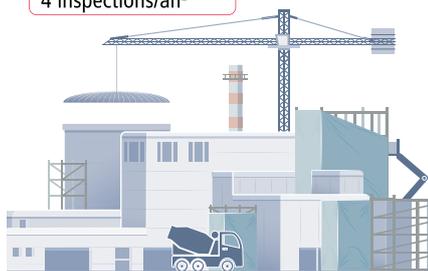
EN CLAIR

Produire des médicaments radiopharmaceutiques en sûreté : trois exemples de suivi des installations

Création, fonctionnement, démantèlement. Ces trois étapes dans la vie d'une installation fabriquant des médicaments radiopharmaceutiques sont suivies par l'IRSN. Quelles sont les missions pour les experts ?

1 Accompagner la création : réacteur Jules Horowitz (RJH)¹

26 avis depuis 2011
4 inspections/an²



Le réacteur de recherche Jules Horowitz produira des radioéléments.

L'IRSN expertise le dossier d'options de sûreté (2003), le rapport préliminaire de sûreté du réacteur (2008), etc.

> Exemple d'action

En 2019, il expertise la méthodologie de qualification des équipements prévue pour le RJH : les mécanismes de commande des absorbants, la robinetterie, etc. But : s'assurer de leur bon fonctionnement sous irradiation en situations normale et accidentelle. Avis IRSN 2019-00126. La qualification des équipements eux-mêmes pourra faire l'objet d'une analyse ultérieure.

2 Suivre le fonctionnement : cyclotron de Cis bio international

17 avis depuis 2011
7 à 8 inspections/an²



Le cyclotron bombarde une cible³ avec des protons. Ceci produit des radionucléides pour des médicaments radiopharmaceutiques.

L'Institut expertise les réexamens périodiques, les modifications de l'installation telle l'utilisation d'une nouvelle cible, etc.

> Exemple d'action

En 2018, les spécialistes étudient la maîtrise des risques liés à l'incendie : la détection, la sectorisation des locaux, la stabilité du bâtiment au feu... Ils vérifient si les systèmes d'extinction automatique conviennent. Verdict : malgré des améliorations, la sûreté attendue n'était pas atteinte. Avis IRSN 2018-00238

3 Préparer le démantèlement : réacteur Osiris, arrêté en 2015

1^{er} avis fin 2022
3 inspections/an²



Osiris génère des neutrons servant à produire des radioéléments pour des médicaments radiopharmaceutiques.

L'IRSN suit des chantiers – démontages d'équipements, évacuation du combustible... – et expertise le dossier de démantèlement.

> Exemple d'action

Depuis 2021, il expertise le dossier de démantèlement de l'exploitant. Les questions sont nombreuses : comment sont prévus les démontages ? Quels moyens de radioprotection sont envisagés ?... Les thématiques – contrôle commande, facteurs humains, ventilation... – sollicitent une dizaine de spécialistes.

¹ Délai accordé pour le premier chargement du combustible nucléaire fixé par décret pour 2028. ² Participation de l'IRSN en tant qu'appui technique de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). ³ Matière première.

Dans le cadre post-Fukushima, l'IRSN intervient depuis 2017 à Romans-sur-Isère, auprès de l'industriel isérois Cerca. Celui-ci fabrique des assemblages combustibles pour les réacteurs de recherche et des cibles d'irradiation, la matière première à usage médical.

L'entreposage est modifié

« Ces alliages d'uranium, conditionnés sous forme de plaques d'aluminium, sont par la suite irradiés en réacteur de recherche pour obtenir le molybdène 99 après extraction chimique [voir infographie p. 15]. Ce procédé de fabrication des cibles médicales est un savoir-faire unique au monde. Peu automatisé, il est un défi pour l'expertise », observe Bernard Casoli, expert en sûreté nucléaire.

Après l'accident japonais, l'usine doit améliorer le comportement des installations en cas de séisme « noyau dur »². Les casiers où sont entreposés les produits de fabrication sont des structures métalliques répondant à des exigences de sûreté strictes, notamment le maintien de leur géométrie en cas

de séisme. « L'avis³ de l'IRSN consolide et valide la proposition de l'exploitant. Elle consiste à revoir la conception des entreposages des substances radioactives. Cela aboutit à la création de nouveaux casiers métalliques plus robustes et à un meilleur ancrage au sol des modèles existants », précise l'expert.

En 2017, l'IRSN s'implique dans la réévaluation périodique de sûreté de l'installation Cerca. L'expertise mobilise pendant un an le chargé d'affaires et six autres spécialistes. « Nos expertises montrent qu'un des bâtiments ne répondait pas complètement aux normes de ventilation nucléaire actuelles au regard du risque de dissémination des substances radioactives, relate Bernard Casoli. Nos échanges avec l'exploitant l'ont incité à accélérer un projet préexistant, qui prévoyait de construire un nouveau bâtiment pour le procédé de fabrication des alliages à base d'uranium. » ■

1. Avis IRSN 2020-00148 et 2020-00194.

2. Spectre forfaitaire extrême retenu pour la mise en place du « noyau dur ».

3. Avis IRSN 2016-00205.

Sûreté du transport : un suivi au long cours

Quelque 300 000 colis de produits radioactifs destinés au secteur médical circulent chaque année en France. Expertises techniques, avis, inspections... sont réalisés pour assurer la sûreté des transports.

En à peine cent-neuf minutes, la moitié des atomes de fluor 18 – le médicament radiopharmaceutique le plus utilisé en médecine nucléaire – se désintègrent naturellement. Cette courte demi-vie¹, caractéristique de la plupart des matières radioactives utilisées en santé, explique le nombre élevé de transports associés. Une quinzaine d'experts de l'Institut contribuent à leur sûreté.

Trois colis, trois risques

« Les colis sont majoritairement qualifiés "d'exceptés". Leur faible concentration d'activité ne nécessite pas des mesures de protection spécifiques durant leur transport », expose Bich Thuy Nguyen, en charge de l'expertise des emballages de transport de matières radioactives. Un tiers sont de type A – radioactivité moyenne – et résistent à des conditions normales de transport.

Les colis de type B (la troisième classe) représentent moins de 1 % des acheminements. Ils convoient les cibles de forte radioactivité en uranium 235 irradié, destinées à la production de radio-isotopes (voir infographie ci-contre). Cette classe est par conséquent très sécurisée et conçue pour résister à un accident de transport. Pesant plusieurs tonnes, ces conteneurs assurent la radioprotection – des travailleurs, du public, de l'environnement – et le confinement des radioéléments. « Cette étape fait l'objet d'une attention particulière de l'IRSN. Lorsqu'elle avait lieu en France, il suivait des déplacements en temps réel, car l'uranium entre dans la composition de l'arme nucléaire [voir webmag]. À chaque modification du colis,

Le colis Agnès peut être utilisé lors de la production des médicaments radiopharmaceutiques. Aurélie Merle-Szérémeta (à gauche) et Bich Thuy Nguyen (à droite), expertes en sûreté des transports, commentent le plan de ce château de plomb.



ou tous les cinq ans, il expertise la demande d'agrément du modèle, en appui du dossier remis à l'Autorité de sûreté nucléaire [ASN] », précise Aurélie Merle-Szérémeta, experte en sûreté des transports.

Des écarts sont analysés

Mis au point dans les années 1990, le modèle de colis « Agnès » est agréé pour le transport routier de cibles d'uranium. Il a connu des évolutions successives.

Le dernier changement majeur concerne ses capots amortisseurs, remplacés en 2015. À chaque extrémité du colis, ces caissons métalliques, qui sont remplis de matériaux déformables, en l'occurrence des blocs de bois, amortissent les chocs en cas d'accident.

« Pour valider ce type de modifications, le dossier de sûreté du requérant doit spécifier des données, telles les caractéristiques mécaniques, la densité et le taux d'humidité du bois. Celles-ci conditionnent la capacité des capots à préserver l'intégrité du

colis en cas de choc », explique l'experte. Ce dossier du requérant fournit les déformations et les contraintes dans le colis en cas d'accident. Celles-ci sont issues de simulations numériques. En 2015, une inspection par l'ASN fait suite à la demande d'agrément du requérant. Elle montre des écarts entre les propriétés des blocs de bois spécifiés dans le dossier et les mesures réalisées lors d'essais. Début 2016, l'Institut expertise de nouveaux essais de l'industriel portant sur les caractéristiques du bois et la tenue mécanique du colis. « À l'aide de simulations numériques, il a analysé les conséquences des écarts constatés lors de l'inspection sur le comportement mécanique du colis soumis aux épreuves réglementaires² de chutes [voir webmag] », relate

WEBMAGAZINE



À LIRE
Comment maîtriser les risques lors du transport ?

www.irsn.fr/R45

Aurélie Merle-Szérémeta. Un premier avis, mi-2016, stipule que cette analyse ne permet pas de conclure. En cause, une modélisation trop simplifiée du comportement du bois. Ce matériau est alors considéré non conforme.

Un an plus tard, un complément d'étude du requérant réalisé à l'aide d'un nouveau modèle prédictif démontre que la nature du bois utilisé n'influence pas la tenue mécanique du colis. « En juin 2018, l'avis de l'IRSN est favorable à l'utilisation des nouveaux capots. Il est assorti de recommandations, destinées à améliorer la sûreté de transport du colis Agnès », rapporte l'experte.

En France, la livraison aux centres de médecine nucléaire n'est pas soumise à une autorisation. Elle est cependant surveillée. « Les conséquences en termes de sûreté sont très limitées avec un colis excepté ou de type A. Mais en raison du grand nombre de ces acheminements, l'ASN effectue ponctuellement des inspections », spécifie Bich Thuy Nguyen.

Fiabiliser l'arrimage

Le transport connaît une vingtaine d'incidents par année : documents mal renseignés, dépassement du débit de dose³ après une erreur de manutention...

La disparition d'un colis est exceptionnelle. Un tel incident est survenu à Nîmes (Gard). Le 19 novembre 2012, l'entreprise Cis bio expédie vers le CHU de la ville une caisse métallique contenant du fluor 18. Sept minutes après le départ de la camionnette de livraison, le chauffeur indique que la porte arrière est ouverte et que le chargement n'est plus à bord. Un automobiliste l'aperçoit au niveau d'un rond-point et prévient la police. Malgré ce signalement précoce, il ne sera jamais retrouvé. L'enquête diligentée par l'ASN met en cause le transporteur qui n'a pas arrimé le colis dans le véhicule. Cet incident – classé 2 sur 7 sur l'échelle Ines⁴ – met en évidence un défaut de culture de sûreté. Il inspirera un guide sur l'arrimage, co-écrit avec l'IRSN. Depuis, le contrôle de l'arrimage est un point d'attention des inspections. ■

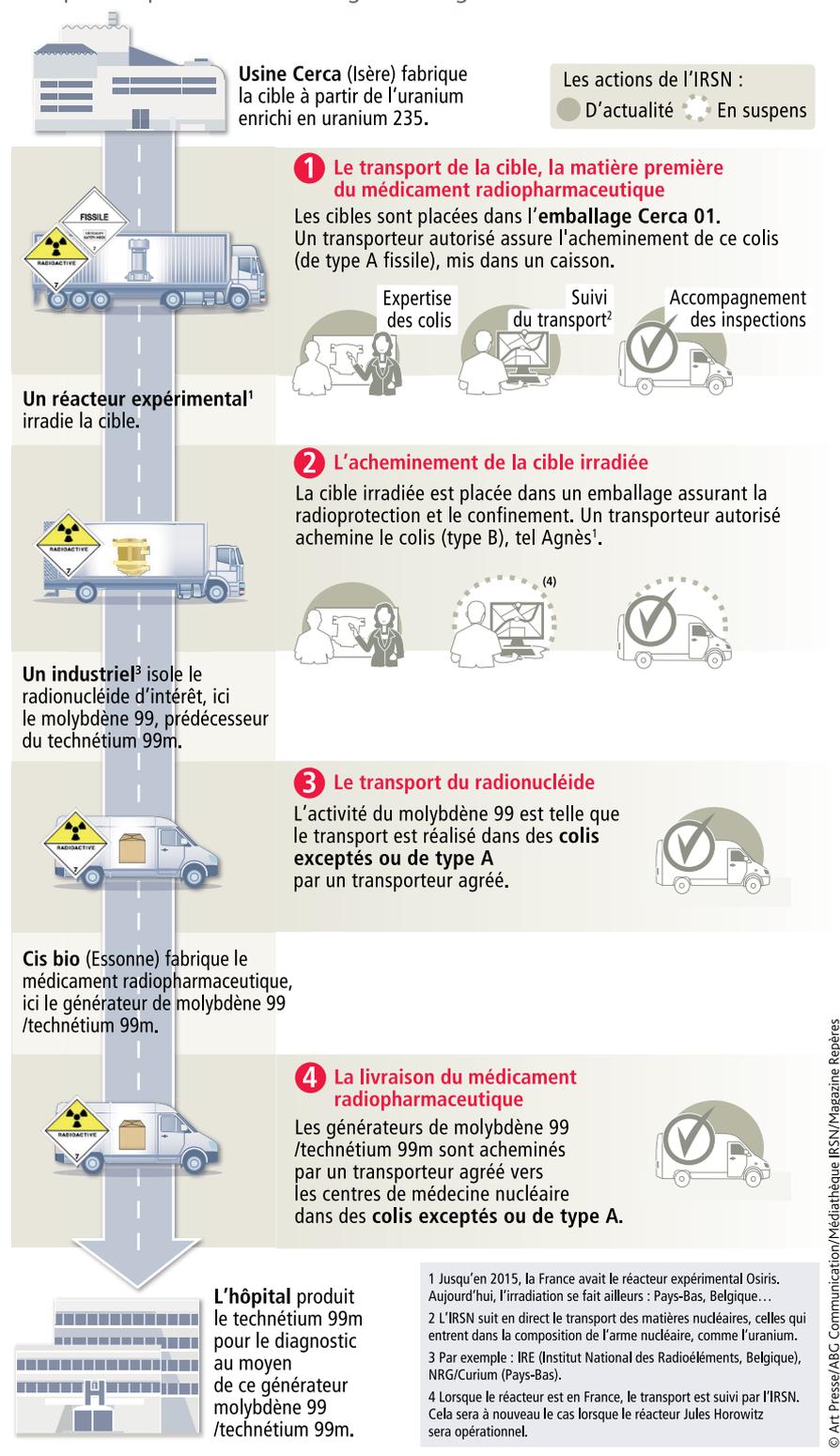
1. Temps nécessaire pour que la moitié des atomes se désintègrent naturellement.
2. Chute d'un mètre sur une cible indéformable, suivie d'une chute de neuf mètres sur une cible indéformable et d'un mètre avec l'impact sur poinçon.
3. L'IRSN peut contrôler le débit de dose au contact du colis et à son voisinage immédiat.
4. Échelle internationale de gravité des événements nucléaires et radiologiques.

www Pour en savoir plus :
Guide ASN : arrimage des colis, matières ou objets radioactifs en vue de leur transport www.asn.fr/

EN CLAIR

Fabriquer un médicament radiopharmaceutique : quelles mesures de sûreté autour du transport ?

L'élaboration des médicaments radiopharmaceutiques comporte plusieurs étapes et nécessite des transports entre divers lieux de fabrication. Des règles de sûreté s'appliquent aux colis, pendant l'acheminement. Exemple d'un produit utilisé en diagnostic : le générateur de technétium 99m.





1



2

Photoreportage : © J.M. Huron/Signatures/Médiathèque IRSN

1 À l'aide d'une jauge de profondeur, Fabienne Bot-Robin, spécialiste du vieillissement des polymères, contrôle le pré- et post-vieillessement des joints d'emballage de transport de matières radioactives.

2 Après un test en enceinte climatique, le joint d'emballage est contrôlé visuellement.

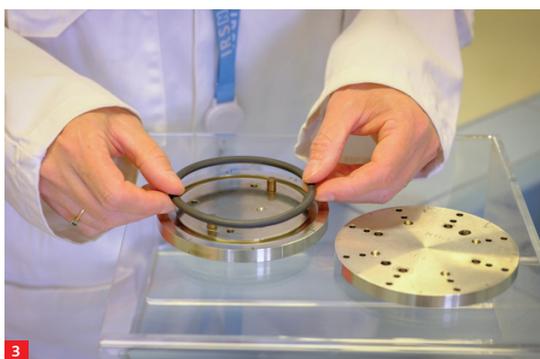
3 Pour être étudié, le joint est mis à plat dans une platine.

4 Les joints d'emballage vus en coupe. La forme ronde du joint avant l'expérience (à gauche) se perd au cours du vieillissement (au centre et à droite).

REPORTAGE Quel est le vieillissement thermique réel des joints des emballages de transport de matières radioactives ? Pour le savoir, les experts sollicitent des chercheurs. Visite à Cadarache (Bouches-du-Rhône).

Joint de colis de transport

Mesurer le retour élastique



3



4

Après plusieurs mois, les essais réalisés à Cadarache sur les joints de colis de transport de matière nucléaire touchent à leur fin. Les résultats obtenus par le Laboratoire d'expérimentation environnement et chimie (L2EC) alimenteront un avis de l'IRSN. Extrapolables aux colis de transport de médicaments radiopharmaceutiques, ces travaux amélioreront les connaissances sur le vieillissement thermique de divers types de joints.

En avril 2020, les experts¹ missionnent le L2EC pour étudier les joints² qui étanchéifient le système de fermeture et le confinement des colis. Dans les conditions normales de transport, le fabricant – à l'issue d'essais standard – estime à 25 % la perte d'élasticité après compression (DRC³). Mais, dès 2016, des études d'un institut allemand⁴ révèlent des DRC plus élevées. « Les experts nous ont demandé de conforter ces données appliquées aux conditions représentatives de transport », raconte la spécialiste du vieillissement des polymères, Fabienne Bot-Robin. Fabienne Bot-Robin et Quentin Ayasse, alternant formé à l'étude du cycle de vie des matériaux, étudient

l'élasticité, après vieillissement, des joints de trois types de gorges de colis, là où se loge le joint.

« Notre projet innovant utilise des maquettes avec des gorges. Il simule réellement les contraintes pendant le vieillissement, précise Quentin Ayasse. Dans l'essai standard, la compression se fait entre deux surfaces planes. » Des mesures dimensionnelles sont réalisées.

« Nous décomprimons le joint et calculons la restitution élastique », détaille Fabienne Bot-Robin. Les résultats, en cours d'analyse, sont similaires aux observations allemandes, mais il semble que la dynamique soit plus rapide en gorge.

Quelles recommandations seraient susceptibles d'en résulter ? « L'une d'elles pourrait être d'augmenter la cadence de changement des joints », avancent les chercheurs. Verdict courant 2021. ■

1. Service de sûreté des transports et des installations du cycle du combustible.

2. Joints à base d'éthylène-propylène-diène monomère (EPDM) et d'élastomère fluoré (FKM).

3. Déformation résiduelle après compression.

4. Institut fédéral pour la recherche et les essais des matériaux.

■ BIBLIOGRAPHIE

Avis IRSN 2020-00166
Avis IRSN 2020-00194
Avis IRSN 2020-00188

Repères n° 45, avril 2020
Matières radioactives, comment maîtriser les risques ?
www.irsn.fr/R45

Repères n° 50, septembre 2021
Transport de radiopharmaceutiques, multiplier les précautions
www.irsn.fr/R50

Sûreté des transports de substances radioactives
www.irsn.fr/transports3

Réglementation relative au transport de substances radioactives
www.irsn.fr/transports2



Un dispositif d'essai est descendu au fond d'une cuve d'étanchéité. L'IRSN mène régulièrement des tests sur des installations ayant été impliquées dans des événements significatifs (ES).

Sûreté

Les enseignements du Rex

L'ESSENTIEL Le retour d'expérience (Rex) doit permettre de tirer des enseignements des événements qui surviennent tout au long de la vie d'une installation nucléaire. Source de questionnements pour l'IRSN, il oriente son expertise.

TÉMOIGNAGE Une inspectrice régionale « risques accidentels » à la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal). **DÉCRYPTAGE** De la détection d'un événement à sa résolution. **AVIS D'EXPERT** Un expert facteurs humains et Rex.



Mélanie
Thomas

Inspectrice régionale « risques accidentels » à la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal) et correspondante du Bureau d'analyse des risques et pollutions industriels (Barpi).

TÉMOIGNAGE “Le retour d'expérience permet d'argumenter auprès des exploitants”

“**E**n tant qu'inspectrice à la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal) – l'équivalent de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) dans le milieu industriel –, j'utilise la base de données Aria au quotidien. Elle est unique en France et en Europe. Elle recense tous les accidents et incidents ayant lieu dans des installations industrielles classées pour la protection de l'environnement (ICPE) – plus de 54 000 survenus en France ou à l'étranger.

Un risque d'explosion confirmé

J'ai travaillé récemment sur un dossier déposé par un industriel. Son installation générait des poussières de zirconium [métal utilisé dans le gainage des combustibles nucléaires]. Le document mentionnait un risque d'incendie, mais pas d'explosion, je trouvais cela étrange. J'ai effectué des recherches dans la base de données Aria, pour voir si des accidents de type

explosions avaient déjà eu lieu avec le même type de poussières, sur d'autres installations. J'en ai trouvé plusieurs. Cela m'a permis d'argumenter auprès de l'exploitant qu'il y avait un risque.

Peu de pays disposent d'une base de données publique d'accidentologie comme celle-ci, conçue pour effectuer facilement des recherches sur les événements. La base Pirex (plateforme intégrée de retour d'expérience) de l'IRSN s'en inspire (*lire p.19*). Le retour d'expérience (Rex) est un sujet transverse. L'IRSN et le Bureau d'analyse des risques et pollutions industriels (Barpi) ont des travaux communs, par exemple sur les causes des accidents. En décembre 2019, ils ont produit conjointement le rapport « Sous-traitance et maîtrise des risques ». Il est illustré avec des événements nucléaires et plusieurs événements ICPE issus de la base Aria. Ce partage permet une vision plus systémique et objective. ■

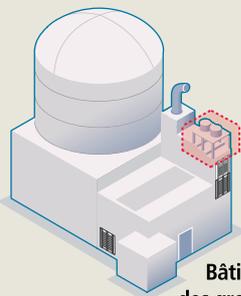
Rex : de la détection d'un événement à sa résolution

Tout événement significatif pour la sûreté sont évaluées. *In fine*, le retour est compris à l'international. Autopsie des groupes électrogènes de secours

1 Un événement significatif de sûreté (ESS) est déclaré et détecté

Lors de contrôles périodiques, EDF constate une **non-conformité** au niveau du réacteur n° 2.

Centrale de Golfech (Tarn-et-Garonne)



Vase d'expansion

Bâtiment des groupes électrogènes

Les structures métalliques supportant les vases d'expansion des deux groupes électrogènes de secours (GES) – composants des circuits de refroidissement – ne correspondent pas aux plans de conception.

2 L'exploitant prend une série de mesures



L'exploitant déclare un ESS à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Il est classé au niveau 1 de l'échelle Ines¹.

EDF réalise des calculs pour savoir si les structures résistent au séisme (SMHV et SMS²). Leur stabilité n'est pas assurée. Un **second écart** est constaté : les ancrages sont sous-dimensionnés, bien que conformes aux plans.

EDF alerte l'ASN : il déclare un **écart générique** à la conception des ancrages des vases d'expansion pour tous les réacteurs de 1 300 MWe.

L'exploitant enquête et produit un **compte-rendu d'événement significatif (Cres)**.
- Description de l'événement
- Analyse des conséquences réelles ou potentielles
- Analyse des causes apparentes et profondes
- Identification des actions correctives.

27 mars 2017

29 mars

avril 2017

mai 2017

24 mai

3 L'IRSN émet des avis réactifs

L'événement est traité par l'équipe dédiée³ à l'analyse du retour d'expérience (Rex).



IRSN
« L'IRSN estime satisfaisante, du point de vue de la sûreté, la solution de renforcement retenue par EDF... »

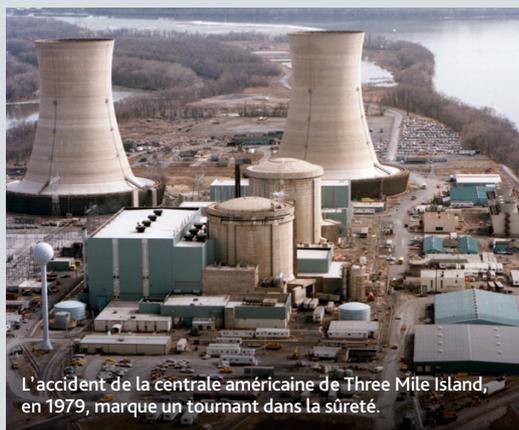
L'IRSN publie un avis, à l'issue de l'expertise de la solution de réparation proposée par l'exploitant (RSN/2017-0175).

¹ Ines : International nuclear event scale, elle comporte 7 niveaux.

² SMHV : séisme majoré historiquement vraisemblable et SMS : séisme majoré de sécurité.

³ Service de sûreté des réacteurs à eau sous pression.

⁴ AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique ; IRS : incident reporting system for operating experience, système international de notification des incidents de l'AIEA.



L'accident de la centrale américaine de Three Mile Island, en 1979, marque un tournant dans la sûreté.

© US Department of Energy

AUX ORIGINES DU REX

La France se dote en 1963* d'un corpus de règles de sûreté. Le décret du 11/12/1963 stipule que « tout accident ou incident nucléaire ou non, ayant ou risquant d'avoir des conséquences notables pour la sûreté des installations, est déclaré sans délai par l'exploitant ».

L'accident de la centrale de Three Mile Island (TMI) aux États-Unis en 1979 a souligné l'importance d'une analyse approfondie de ces événements et d'un partage des enseignements.

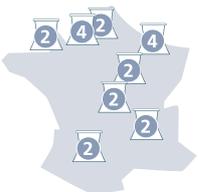
* Décret n° 63-1228 du 11 décembre 1963.

QUELLES OBLIGATIONS POUR L'EXPLOITANT ?

L'exploitant d'une installation nucléaire de base a l'obligation de **déclarer sous quarante-huit heures** aux autorités tout événement significatif relatif à la sûreté, à la radioprotection, à la protection de l'environnement et au transport de matières radioactives (ESS). Les événements sont classés sur l'échelle internationale de gravité Ines (International Nuclear Event Scale), qui comporte huit niveaux de 0 à 7.

sûreté (ESS) est analysé par l'IRSN. Ses conséquences pour l'expérience (Rex) est partagé pour améliorer la sûreté, d'un Rex débuté en 2017 : le comportement au séisme à moteur diesel des réacteurs nucléaires de 1 300 MWe.

4 L'exploitant étend ses contrôles



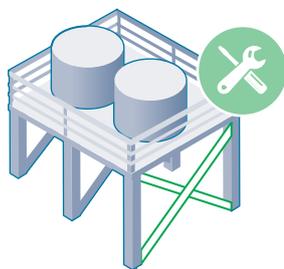
Au titre du Rex, EDF contrôle les vingt réacteurs de 1 300 MWe. D'autres défauts d'ancrage sont identifiés sur une dizaine de matériels auxiliaires nécessaires au fonctionnement des groupes électrogènes

de secours sur le réacteur 3 de la centrale de Paluel (Seine-Maritime). C'est un problème générique.

EDF déclare un ESS à l'ASN pour tous les réacteurs de 1 300 MWe. Il est classé au niveau 2 sur l'échelle Ines. L'exploitant engage des renforcements de tous les ancrages concernés.

5 Les ancrages sont réparés

L'exploitant met en conformité les ancrages concernés et informe l'IRSN de l'avancement de l'action. La conformité est vérifiée lors d'inspections. La sûreté est renforcée : les supports des vases d'expansion sont résistants à un séisme SMS.



6 L'événement est partagé



À l'international : l'événement résolu et son mode de traitement sont consignés dans la base IRS de l'AIEA⁴. En France : de la détection, à la résolution, l'ESS est décrit dans la base de données Rex.

Publication d'un autre avis à la suite des nouveaux écarts détectés par l'exploitant et basé sur des calculs des experts de l'IRSN. Quels sont les risques ? Les dispositions proposées par l'exploitant sont-elles robustes ? Le document stipule : « Les éléments transmis par l'exploitant à ce jour ne permettent pas de se prononcer sur la capacité des GES dans leur état actuel à fonctionner en cas de séisme de niveau SMHV. » (IRSN/2017-00197).



© Art Presse/ABC Communication/Médiathèque IRSN/Magazine Repères

AVIS D'EXPERT



Jean-Marie Rousseau

Expert facteurs humains et retour d'expérience

“Le Rex oriente l'expertise”

La plateforme intégrée de retour d'expérience (Rex), Pirex, est déployée à l'IRSN depuis décembre 2020. Cette refonte du dispositif de traitement du Rex a été motivée par le manque d'optimisation des enseignements que nous tirions des événements significatifs (ES), notamment sur les installations nucléaires de base (INB). Pirex propose un modèle partagé de ce qu'est un ES, de ce qu'il apporte à l'expertise : des traces descriptives et factuelles de l'exploitation, des défaillances de lignes de défense pour maîtriser les risques, des dispositions pour récupérer ces défaillances. Avec ses méthodes d'analyse, il est possible d'établir des profils de défaillance – par INB, par année, etc. – pour repérer des évolutions, évaluer les plans d'action des exploitants... Plus qu'une base pour stocker et suivre tous les ES, Pirex permet d'approfondir davantage l'analyse des événements *a posteriori*. Cet outil proactif oriente l'expertise et illustre nos conclusions. Ainsi, dix ans de comptes-rendus d'ES de l'usine de retraitement des combustibles de La Hague (Manche) aident à préparer son réexamen de sûreté. L'outil décloisonné et collaboratif est ouvert à tous les experts de l'IRSN : neutronique, génie civil... Un événement est multidisciplinaire. Chacun, avec ses connaissances spécifiques et pointues, a son point de vue. Nous souhaitons rendre la plateforme progressivement accessible à d'autres acteurs pouvant exploiter les Rex : Autorité de sûreté nucléaire (ASN), exploitants, société civile.

LA BASE INTERNATIONALE IRS

Mise en place en 1980 après l'accident de Three Mile Island, la base de données de l'IRS* est ouverte aux signataires de la Convention sur la sûreté nucléaire. Elle est gérée par l'AIEA (International Atomic Energy Agency) et l'AEN (Agence pour l'énergie nucléaire). Les pays participants partagent leur expérience et les enseignements pour améliorer la sûreté des centrales. Début 2019, l'IRS comptait 4 332 rapports, dont 421 fournis par la France.

* Incident Reporting System for operating experience, est un système international de notification pour l'expérience d'exploitation.

POUR ALLER PLUS LOIN

Rapport « Anticipation et résilience : réflexions dix ans après l'accident de Fukushima Daiichi », mars 2021. www.irsn.fr/Resilience-Fukushima
Livre « Éléments de sûreté nucléaire – Les réacteurs à eau sous pression », 2021. www.irsn.fr/CST

CONTACT

Service de sûreté des réacteurs à eau pressurisée
Olivier Loiseau, olivier.loiseau@irsn.fr



Jean-Marie Rousseau
jean-marie.rousseau@irsn.fr

Risque radiologique : les citoyens s'impliquent

Quel est l'impact d'une centrale sur son environnement ? Des élus et la population des territoires concernés s'impliquent sur ce thème auprès des experts. Illustration à Saint-Maurice-l'Exil (Isère), lieu de la première étude radiologique de site.

1 Pourquoi une étude à Saint-Alban ?

Sur la commune de Saint-Maurice-l'Exil, où est partiellement implantée la centrale nucléaire de Saint-Alban Saint-Maurice, les habitants sont surtout préoccupés par les usines chimiques, nombreuses dans la vallée du Rhône. « La centrale fait partie du paysage depuis 1985. Les gens ont appris à vivre avec cette installation qui n'engendre aucune nuisance olfactive ou visuelle », constate le maire Philippe Genty. Les seuls griefs des habitants de Saint-Maurice-l'Exil à l'égard du centre nucléaire de production d'électricité (CNPE) concernent depuis peu le bruit engendré par la mise en route des moteurs diesel d'ultime secours¹ lors des tests menés en pleine nuit.

L'étude radiologique de site, initiée en 2019 par l'IRSN sur les communes proches de la centrale, est la première du genre. Ce choix n'est pas motivé par une préoccupation environnementale ou sanitaire vis-à-vis du risque radiologique. L'Institut a choisi ce site car l'ensemble des parties prenantes – élus locaux, habitants, acteurs de la société civile et l'exploitant de la centrale – étaient disposés à travailler de concert pour mener à bien ce programme.

1. Après l'accident de Fukushima Daiichi, provoqué notamment par la défaillance des groupes électrogènes alimentant la centrale japonaise, EDF dote les réacteurs du parc nucléaire français d'un moteur diesel de secours autonome.

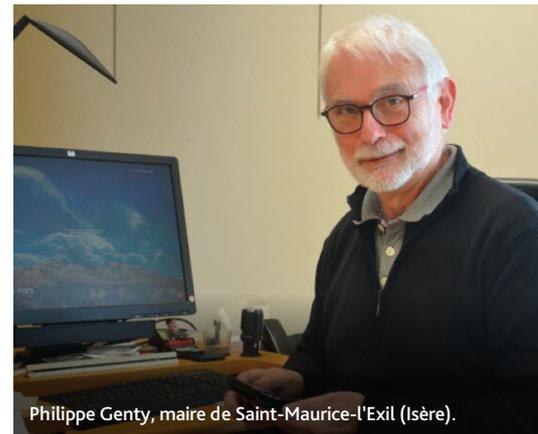


Les techniciens de l'IRSN prélèvent des légumes près de la centrale de Saint-Alban Saint-Maurice (Isère), en septembre 2021.

2 En quoi consiste cette étude ?

L'étude a pour but d'améliorer les connaissances sur l'influence des rejets de radionucléides de la centrale sur son environnement et d'estimer de manière la plus réaliste possible l'exposition des populations avoisinantes. Elle est organisée autour de trois axes : des études de terrain – milieux atmosphérique, terrestre et aquatique –, des enquêtes de proximité et l'implication des acteurs locaux. Les experts informent les habitants sur le risque radiologique au fil des investigations. Ils les aident à s'impliquer dans la mesure de la radioactivité ambiante. « C'est une étude à laquelle le public est pleinement associé », confirme Philippe Genty. Un groupe de suivi composé d'acteurs locaux a été mis en place dès le début du programme par la Commission locale d'information (Cli) de Saint-Alban. Ses missions : exposer les besoins et attentes de la société civile, participer au programme d'études, émettre des avis sur la manière de restituer les résultats...

www Pour en savoir plus : Résultats en ligne www.irsn.fr/ERS-St-Alban



Philippe Genty, maire de Saint-Maurice-l'Exil (Isère).



Un technicien de l'IRSN informe la population sur l'étude. Ici, discussion avec des agriculteurs.

3 Les exigences des élus sont-elles prises en compte ?

L'étude se déroule en concertation avec les élus. Une quarantaine de communes est impliquée. « À notre demande, elle comprend l'analyse des plateaux-repas servis dans les cantines scolaires et la mesure des rejets de tritium dans l'eau du Rhône sur une année complète », illustre Philippe Genty. Au cours de l'année 2021, en fonction du débit du Rhône, des mesures du niveau de tritium dans l'eau du fleuve

sont réalisées en amont et en aval du CNPE. Objectif de cette campagne d'analyse : mieux comprendre les phénomènes de diffusion des rejets d'effluents radioactifs lorsque le niveau du fleuve est au plus bas. « Ce suivi au long cours devrait contribuer à rassurer nos administrés concernant la qualité des eaux de la base nautique située en aval de la centrale », ajoute l'édile.



L'IRSN présente l'étude radiologique du site, lors de l'assemblée générale de la Cli de Saint-Alban en décembre 2019.

4 Comment la société civile est-elle impliquée ?

Élus, associations et citoyens donnent leur avis via le groupe de suivi initié par la Cli locale. « Des réunions organisées trois fois par an informent de l'avancement des investigations et des éventuels blocages », expose Philippe Genty. À l'issue de ce programme de recherche, prévue fin 2021², ce collectif restituera les résultats auprès de la population et des contributeurs. Réalisées pendant l'été 2020 avec le soutien des élus, les enquêtes de proximité – entretiens et questionnaires – caractérisent les habitudes alimentaires et le mode de vie des riverains. Elles recueillent des informations auprès de 120 foyers et 275 personnes de 34 communes. « Avec les experts, nous avons su convaincre la population que cette enquête était primordiale pour établir des scénarios réalistes d'exposition », précise le maire.

² Le planning et le contenu sont adaptés compte tenu de la pandémie. L'IRSN met tout en œuvre pour maintenir une restitution publique fin 2021.

5 Quels sont les bénéfices et conclusions attendus ?

L'étude servira à établir un calcul réaliste de l'exposition des populations riveraines. Elle permettra de mieux connaître la zone d'influence des rejets de la centrale pour chaque compartiment de l'environnement – air, eau, alimentation, faune, flore, etc. – avec une précision inédite. Deux raisons à cela. D'abord les moyens utilisés sont très performants et mesurent la radioactivité à des niveaux plus bas que ceux utilisés pour la surveillance de l'environnement.

Puis, il y a le nombre et la diversité des types de prélèvements et d'analyses réalisés. Les premiers résultats des études atmosphériques montrent que l'effet des rejets atmosphériques en tritium dans l'axe des vents dominants (nord-sud) est mesurable dans l'air à proximité du site entre 1 et 3-4 km. Au-delà, et dans l'axe opposé (est-ouest), les activités sont dans la gamme du bruit de fond radiologique. L'ensemble des résultats sera disponible en ligne.



Prélèvement de sédiments dans le Rhône, près de la centrale.

Lutèce

Des expériences en béton

Connaître l'évolution du béton au cours du temps est essentiel pour la sûreté d'un stockage géologique de déchets radioactifs. Au sein de la plateforme expérimentale Lutèce, des recherches sont réalisées sur le vieillissement de ce matériau dans l'environnement du stockage profond.

Ici, la lumière est éclatante et les appareils immaculés. On est loin de l'ambiance souterraine du laboratoire de la Meuse (Haute-Marne), dédié aux recherches sur la sûreté du projet Cigéo¹. Pourtant, c'est là – dans les Hauts-de-Seine, au sein de la plateforme Lutèce², à Fontenay-aux-Roses – qu'est menée une partie des expérimentations sur l'évolution des composants des ouvrages de stockage profond de déchets radioactifs. Des études sont réalisées sur les matériaux cimentaires.

Éviter l'agression du ciment

Les résultats alimenteront l'expertise que l'IRSN conduit sur le projet de stockage. Ils nourriront les modèles existants qui simulent le comportement chimie-mécanique du système de fermeture de Cigéo.

Théoriquement, à la fermeture du site de stockage dans cent-cinquante ans, un scellement composé d'argile gonflante doit être posé. Son gonflement sera maîtrisé par deux massifs d'appui en béton, conçus pour durer des milliers d'années. « *L'eau contenue dans la roche environnante a un pH aux alentours de 8. Celui d'un ciment classique avoisine 1. En utilisant un béton dit bas-pH, l'Andra³ espère diminuer cet écart et éviter que le ciment ne soit agressé par la roche et inversement* », précise Mejdj Neji, chercheur en physico-chimie des matériaux. Mais comment cette matrice cimentaire se

comportera-t-elle au contact des eaux du milieu environnant ? « *L'utilisation de ce matériau bas-pH, envisagée par l'exploitant³, n'est pas encore validée. L'Institut souhaite vérifier qu'il préservera ses propriétés mécaniques afin de maintenir le bouchon de scellement.* »

La thèse de Charlotte Dewitte au Laboratoire d'étude et de recherche sur les transferts et les interactions dans les sous-sols (Letis) doit apporter des réponses. Elle analyse l'impact d'un enrichissement en magnésium du béton bas-pH. « *L'eau contenue dans la roche [l'eau porale] présente une quantité non négligeable de magnésium* », indique Mejdj Neji. Cet élément interagit avec le béton, provoquant une précipitation de silicate de magnésium hydraté (M-S-H). « *Est-ce ou non une bonne chose pour le matériau cimentaire ? La communauté scientifique n'a pas tranché sur cette question* », commente le chercheur.

Le matériau dégradé est étudié

Les chercheurs de l'Institut ont élaboré une pâte de M-S-H. Ce matériau modèle permet de se focaliser exclusivement sur cette espèce chimique. Désormais il est caractérisé, grâce à des mesures de nano-indentation⁴, pour estimer la distribution de ses propriétés mécaniques. C'est l'une des quatre techniques complémentaires mises en œuvre au Laboratoire, pour étudier chimiquement



et mécaniquement un matériau dégradé. Parallèlement, la dégradation magnésienne est étudiée sur des échantillons industriels : des carottes de ciment bas-pH sont immergées dans une solution de chlorure de magnésium, des conditions favorables à la précipitation de M-S-H. « *Nous sommes parvenus à créer en peu de temps [deux mois] un enrichissement en magnésium assez important pour qu'il puisse être caractérisé mécaniquement* », se félicite Mejdj Neji. ■

1. Projet français de stockage profond de déchets radioactifs.
2. Lutèce, Laboratoire unifié d'expérimentation et de caractérisation de transferts.
3. Andra, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.
4. Technique de caractérisation mécanique.

WEBMAGAZINE



DIAPORAMA

Repérer
des espèces
cristallines

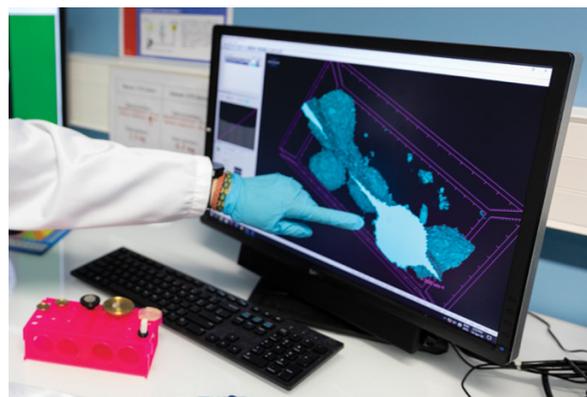
irsn.fr/R51



© Christophe Debayle

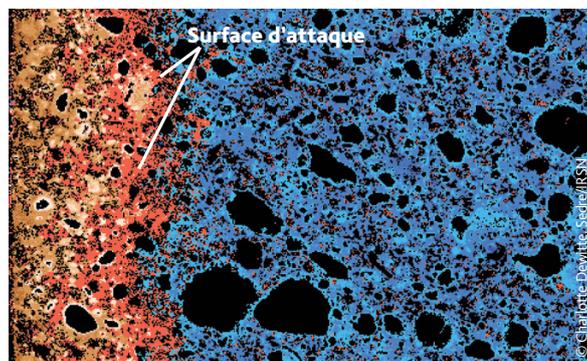
Des techniques complémentaires

Charlotte Dewitte, en seconde année de thèse, observe un échantillon de béton au microscope électronique à balayage (MEB) pour analyser son état à l'échelle microscopique. À Lutèce, plusieurs moyens sont utilisés pour analyser un béton en plus de la MEB : la diffraction à rayon X, la microtomographie, l'autoradiographie et la nano-indentation. Ces techniques sont complémentaires. Elles assurent une parfaite caractérisation du matériau cimentaire.



Une analyse non destructive

L'analyse par microtomographie au rayon X révèle une image en trois dimensions du matériau. Elle permet d'étudier l'évolution de son réseau poreux, de visualiser sa porosité, d'éventuels défauts de structure et des différences de densité... Il s'agit d'une technique non destructive.



© Charlotte Dewitte - Sciences IRSN

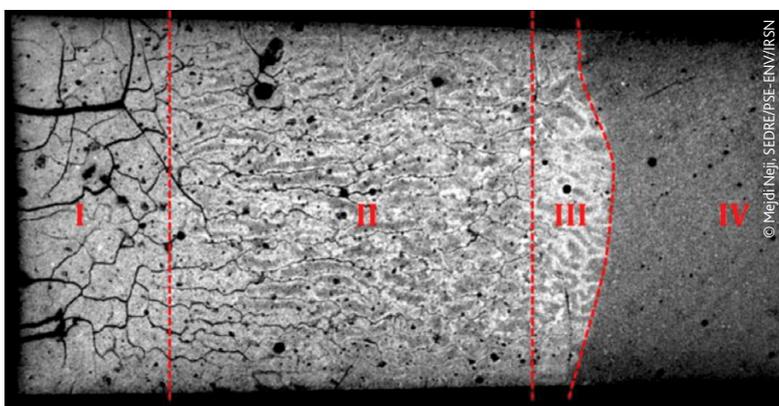
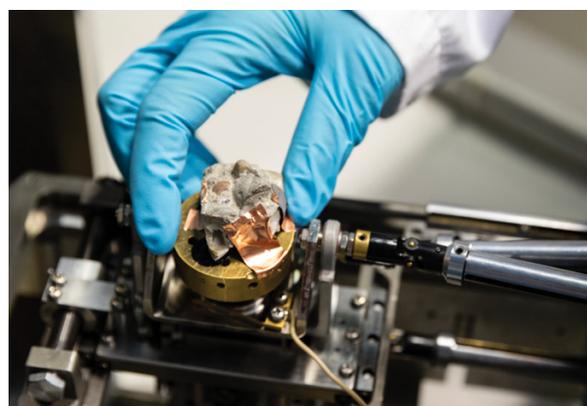


Gros plan sur un échantillon de béton destiné à l'analyse minéralogique par un microscope électronique à balayage (MEB).

Reportage photo : © Philippe Dureau / Médiathèque IRSN

Caractériser l'enrichissement en magnésium

Après deux mois d'enrichissement en magnésium d'une tranche de béton bas-pH, un front d'attaque (en marron) est observé par MEB équipé d'une sonde dispersive en énergie (en bleu, la matrice saine). Cet enrichissement est-il synonyme de dégradation ? C'est ce que doit déterminer la thèse de Charlotte Dewitte, via des mesures complémentaires de nano-indentation, qui permettront de caractériser ses propriétés mécaniques.



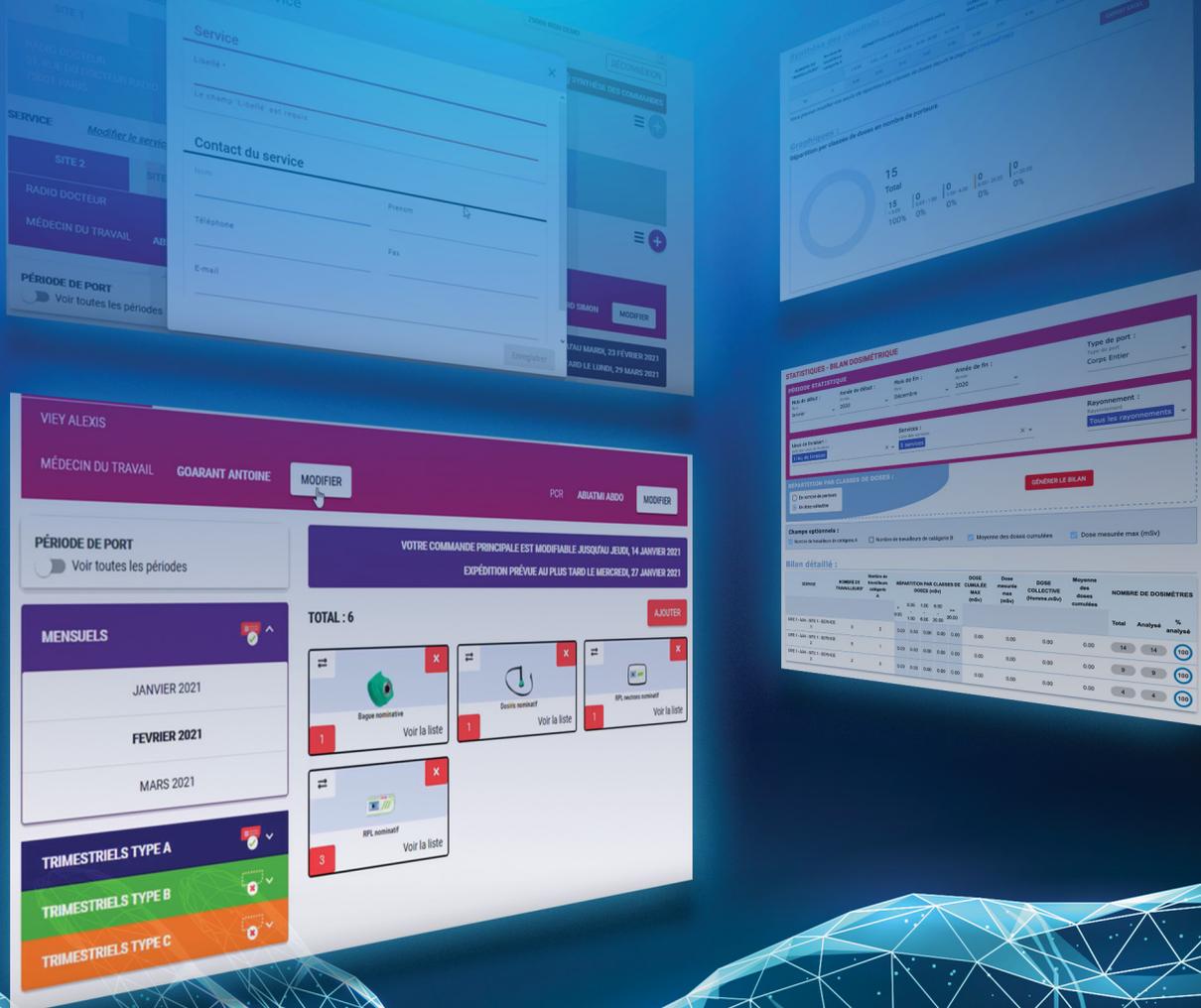
© Mejdji Neji, SEDRE/PSE-EN/IRSN

La carbonatation fissure le béton bas-pH

Le CO₂ présent dans l'air carbonate les matériaux cimentaires. Quel est son effet sur le béton bas-pH ? La fissuration apparaît (à gauche sur la photo). Ce résultat, obtenu en microtomographie, est déjà utilisé pour la validation des modèles de carbonatation.

Quel comportement chimico-mécanique ?

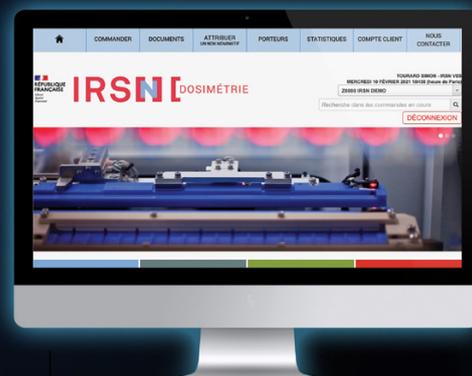
Les scientifiques ont besoin de connaître la composition chimique du béton. Ils ont alors recours à la MEB. Gros plan sur l'installation d'un échantillon dans la chambre à vide d'un MEB.



Votre dosimétrie en quelques clics

Vous êtes conseiller en radioprotection et en charge des dosimètres de votre établissement ?

Le portail *monDosimetre* vous facilite leur gestion. En quelques clics, commandez vos dosimètres, mettez à jour les fiches des porteurs, éditez vos tableaux de bord logistiques, personnalisez vos bilans dosimétriques... et découvrez régulièrement de nouvelles fonctionnalités. *IRSN dosimétrie* vous accompagne, quel que soit votre domaine d'activité – médical, industriel, nucléaire, recherche – ou la taille de votre structure. Votre abonnement est accessible où que vous soyez, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7.



Contactez-nous

IRSN DOSIMÉTRIE
 dosimetre@irsn.fr
 www.dosimetrie.irsn.fr
 https://mondosimetre.irsn.fr

IRSN
 INSTITUT DE RADIOPROTECTION
 ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE