



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

REPÈRES

EN PRATIQUE

Changements en radiothérapie :
un guide pour les professionnels

FAITS ET PERSPECTIVES

Incident à Golfech : une analyse
approfondie est réalisée

DOSSIER

Exposition aux rayonnements
Le suivi des professionnels est optimisé



Les actions en cas d'accident nucléaire

Que se passe-t-il en cas de crise nucléaire ou radiologique ? Prise en charge des personnes exposées, mesures de la contamination interne, coordination des acteurs, suivi sanitaire... Tout en images, la spécialiste des expositions aux rayonnements, Jeanne Loyen, fait le point sur les actions déployées près du site accidenté et par le Centre technique de crise à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine). www.irsn.fr/crise-film

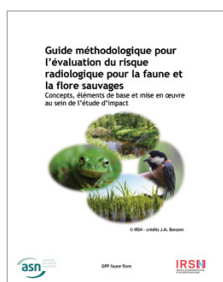


L'étude du tritium dans la Loire

Les résultats de la campagne de mesures et des modélisations des concentrations en tritium dans la Loire, réalisées par l'IRSN en lien avec l'Autorité de sûreté nucléaire, sont consultables sur

irsn.fr. Ces investigations font suite à la détection, par une association citoyenne, d'un niveau anormalement élevé de tritium (310 Bq/L) dans le fleuve en janvier 2019. Le rapport fournit des recommandations sur l'importance de la modélisation des rejets pour confirmer la représentativité des mesures de surveillance.

www.irsn.fr/tritium



Risque radiologique pour la faune et la flore

Comment caractériser l'impact des installations et des activités nucléaires sur l'environnement ? Comment évaluer le risque radiologique pour la faune et la flore sauvages ? Élaboré par un groupe piloté par l'IRSN, un guide méthodologique propose une approche graduée, applicable aux situations de fonctionnement normal ou post-incident ou accident. Il s'adresse aux exploitants d'installations, bureaux d'étude, autorités, associations... www.irsn.fr/risque-faune-flore

Agenda

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

19 et 20 mai
Lyon (Rhône)

Journées du RP Cirkus

Acteurs de la radioprotection, lors des journées techniques de l'association Radioprotection Cirkus, échangez avec les experts du Laboratoire de dosimétrie de l'IRSN et visitez leur installation mobile d'anthroporadiométrie.

www.rpcirkus.org/fr/

14 au 17 juin
Strasbourg (Bas-Rhin)
Santé au travail

Découvrez l'actualité lors du 36^e congrès national. Impact de la révolution numérique, évolutions des organisations sur la santé des salariés, etc. seront traités. À noter, une thématique spéciale « Covid-19 et travail ».

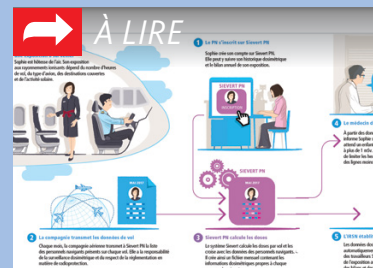
www.medecine-sante-travail.com

Online WEBMAG

www.irsn.fr/R53



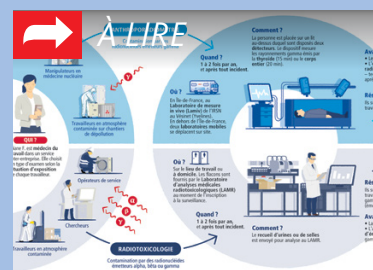
Dossier
Radioprotection : nouveaux besoins, nouvelles solutions



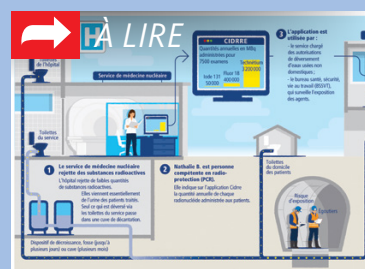
Dossier
Sievert PN aide le personnel navigant



Dossier
Bien choisir son dosimètre



Dossier
Anthroporadiométrie ou radiotoxicologie ?



Dossier
Cidre : l'exposition des égoutiers



Dossier
La réforme du système Siseri

Abonnement

POUR VOUS ABONNER :
www.irsn.fr

Rubrique l'IRSN > Publications
> Magazine Repères

DIAPORAMA



Reportage
Elfe : mieux dimensionner les températures des essais

Sommaire

En couverture : La cardiologie interventionnelle expose le professionnel de santé aux rayonnements ionisants.

P.4 TEMPS FORTS

Corrosion sous contrainte
Une expertise longue s'engage

Guerre en Ukraine
L'IRSN réalise une veille et des simulations



P.6 FAITS ET PERSPECTIVES

Incident à Golfech
Une analyse approfondie est réalisée

P.9 ZOOM

Jeu de go

DOSSIER P.10

Dossier du prochain N° :
Cycle du combustible : anticiper entreposage et saturation

Exposition aux rayonnements
Le suivi des professionnels est optimisé

P.17 EN PRATIQUE

Changement de techniques et de matériels
Un guide pour les professionnels en radiothérapie

P.20 INTÉRÊT PUBLIC

Quand la microscopie électronique stimule les échanges



P.22 REPORTAGE

Cocagne
Crayons de combustible sous pression



© Joanna Tardet/Cauteur/Signatures/Médiathèque IRSN

Exposition des travailleurs Des études ciblées

Année après année, le bilan présenté dans le rapport annuel de l'IRSN sur l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants s'enrichit. Depuis 2018, cette photographie macroscopique a gagné en précision grâce à l'exploitation des données du Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants (Siseri). Pour mieux appréhender les risques dans certains secteurs – les travailleurs du nucléaire, les personnels navigants (PN), etc. –, les experts réalisent depuis les années 2010 des études ciblées. Elles enrichissent le bilan annuel. Les sujets de ces études sont choisis en concertation avec la Direction générale du travail, pour tenir compte de ses préoccupations sur le risque d'exposition. L'analyse s'appuie sur des données extraites de Siseri et sur des informations complémentaires, fournies par l'Autorité de sûreté nucléaire, les employeurs, etc. Le focus sur les PN de 2020 bénéficie d'échanges entre les experts IRSN de l'outil Sievert PN et Air France. Ceci a permis de mieux interpréter la hausse du nombre de PN qui affichaient les doses les plus élevées entre 2015 et 2019.

Juliette Feuarent

Spécialiste des expositions professionnelles

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 Verry, Pascale Monti – Comité de lecture : Louis-Michel Guillaume – Rédaction et réalisation, maquette et direction artistique : ABG Communication – Iconographie : Valérie Delchambre – Photos de couverture : © A. Noor/Image Point FR/BSIP – Impression : Handiprint (50) – Imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement – ISSN : 2103-3811 et 2491-8776 (Web) – avril 2022.

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

IRM

Au cœur d'un assemblage

Comprendre les phénomènes en jeu lorsque les crayons de combustible se déforment est primordial pour maîtriser le refroidissement d'un cœur de réacteur en cas d'accident par perte de réfrigérant primaire (APRP). Ces déformations créent des zones plus difficiles à refroidir. Pour étudier les écoulements d'eau dans ces zones, les chercheurs utilisent une technique novatrice – la vélocimétrie* par résonance magnétique (VRM) – pour les visualiser en 3D, de manière non intrusive. Des crayons de géométrie prototypique sont placés dans un appareil d'IRM (imagerie à résonance magnétique). Les résultats montrent quantitativement la manière dont les crayons déformés modifient le parcours de l'eau. Ils serviront à la validation du logiciel Draccar de l'IRSN, utilisé lors de l'analyse des dossiers de sûreté des exploitants. Deux entités y participent : le Laboratoire d'étude et de modélisation du combustible de l'IRSN à Cadarache (Bouches-du-Rhône) et le Laboratoire énergies et mécanique théorique et appliquée (Université de Lorraine-CNRS) à Vandœuvre-lès-Nancy (Meurthe-et-Moselle).

Pour en savoir plus, lire le *Reportage* (p. 22).

* Mesure des vitesses.

EXPOSITION DES PROFESSIONNELS

6 travailleurs

ont reçu en 2020 une dose individuelle annuelle dépassant 20 mSv*, cinq en exposition externe, un en interne.

* limite annuelle réglementaire

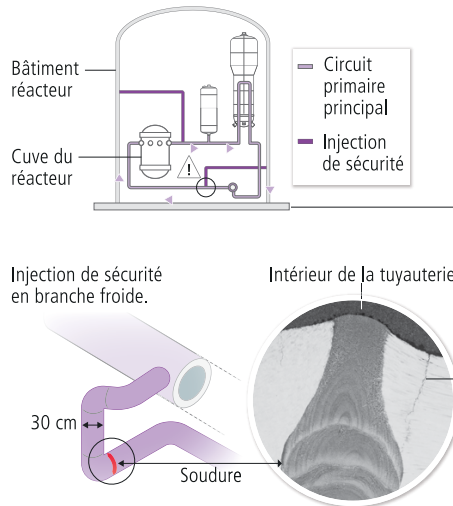
18

reconstitutions de dose interne sont réalisées par l'IRSN en 2019.

Retrouver le dossier « Exposition des professionnels » en page 10.

Sûreté

La découverte de fissures de corrosion sous contrainte sur une tuyauterie

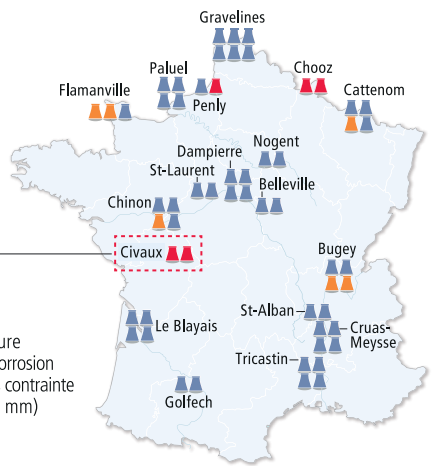


La première fissure détectée à Civaux est proche d'une soudure*. La première passe de cette soudure, dite racine, est inhabituellement épaisse.

* Civaux 1 – Soudure 1 RCP 054 TY A12 - Procédé TIG Automatique – Vue d'ensemble après attaque électrochimique à l'acide nitrique 50%.

Les répercussions au niveau des centrales, à la date du 10 mars 2022

● 5 réacteurs arrêtés ● 6 contrôles priorités par EDF au 1^{er} semestre 2022



Les réacteurs arrêtés sont mis en service entre 1990 et 1999. Les contrôles non destructifs à venir incluent d'autres réacteurs plus anciens.

Corrosion sous contrainte

Une expertise longue s'engage

Profonde de plusieurs millimètres, la fissure serpente autour d'une tuyauterie du système d'injection de sécurité, outil essentiel au refroidissement du réacteur en cas d'accident avec perte d'eau du circuit primaire (CP). EDF la détecte en août 2021, lors de la deuxième visite décennale de l'unité 1 de la centrale de Civaux (Vienne). C'est la première d'une série. En six mois, cinq réacteurs sont arrêtés en France pour cause de fissures dues à la corrosion sous contrainte (CSC).

Une dizaine d'experts mobilisés

En août, l'industriel soupçonne un problème causé par la fatigue thermique. La tuyauterie est découpée. Son analyse en laboratoire infirme cette hypothèse : il s'agit de CSC. « Ce type de fissure met du temps à apparaître. Mais une fois amorcée, elle se propage, décrypte Olivier Dubois, expert sûreté. Sa vitesse de propagation est difficile à prévoir. » Composition de l'acier, soudures, chimie du CP... des précautions prises pour l'éviter n'auront pas suffi. L'IRSN, informé en septembre, alerte l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en octobre, quand il s'avère que la fissure est circonférentielle. « Son emplacement est problématique : en cas de fuite ou de brèche sur plus d'une ligne d'injection

de sécurité alimentant le réacteur, la sûreté serait fortement compromise », souligne l'expert.

Réparer ce défaut nécessite de couper, refaire, puis resouder les nouvelles portions de tuyauteries, un processus long, qui expose le personnel aux rayonnements ionisants. Avant d'engager des travaux, il faut cerner l'origine du problème et contrôler tous les réacteurs potentiellement concernés. « La première passe de la soudure proche de la fissure, inhabituellement épaisse, pourrait fragiliser le circuit », explique l'expert. La causalité n'est pas encore confirmée.

Un dialogue s'instaure entre l'IRSN, EDF et l'ASN. L'Institut prend part aux inspections à Civaux. « Les connaissances et les recherches bibliographiques de nos experts ne révèlent pas de retour d'expérience comparable », rapporte Olivier Dubois. L'équipe de l'IRSN compte une dizaine de spécialistes des contrôles non destructifs, des matériaux, de la corrosion, thermohydraulique...

L'expertise de cette situation, très préoccupante du point de vue de la sûreté, durera probablement plusieurs années.

www Pour en savoir plus : Endommagement par corrosion sous contrainte de tuyauteries connectées au circuit primaire principal de réacteurs d'EDF www.irsn.fr/corrosion-contrainte

Crise



La centrale de Zaporozje – 6 000 MWe – est la plus grande en Europe. Elle est passée sous le contrôle des forces russes.

© Konstantin Mihalchevskiy/Sputnik/AFP

Guerre en Ukraine L'IRSN réalise une veille et des simulations

Dès le 25 février dernier, le lendemain du début de l'invasion armée de l'Ukraine par la Russie, l'Institut active son centre technique de crise (CTC) à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine). S'agissant d'un pays nucléarisé – quinze réacteurs et le site de Tchernobyl – le CTC évalue la situation nucléaire et radiologique. Une dizaine de spécialistes effectue cette veille au quotidien. Au fur et à mesure des événements – agressions d'un dépôt de déchets à Kiev et d'une source de neutrons pour la médecine et la recherche à Kharkiv, incendie à la centrale de Zaporozje, perte d'alimentation électrique à Tchernobyl –, les experts envisagent divers scénarios. Avec des codes de calcul,

ils étudient les termes sources potentiels (nature, quantité et cinétique des rejets radioactifs). Ils estiment la dispersion de radionucléides et les retombées pour l'homme et l'environnement.

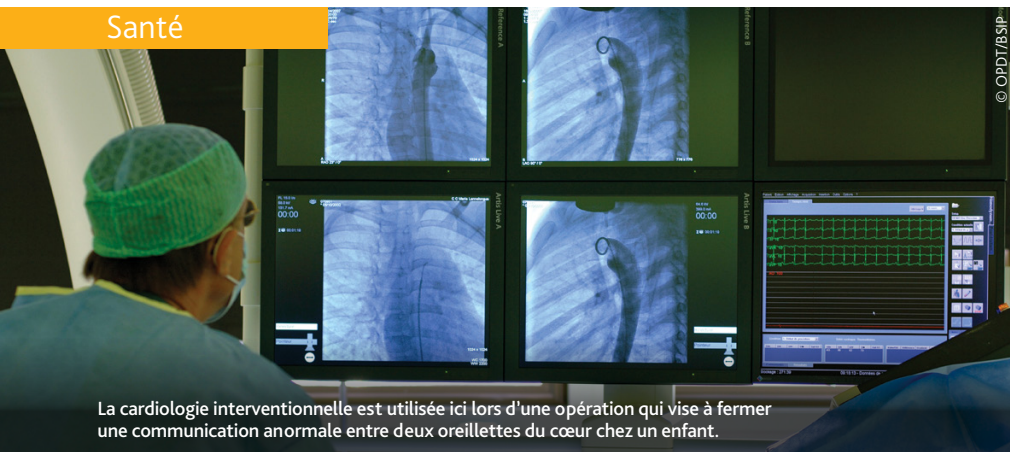
L'IRSN s'adapte en temps réel*, répond aux sollicitations des pouvoirs publics, des médias et de la société civile, en lien avec les ministères des Affaires étrangères, de la Santé...

L'Institut soutient l'action du directeur général de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) pour un arrêt de toutes les opérations militaires à proximité et contre les sites nucléaires en Ukraine.

* Voir les notes sur irsn.fr www.irsn.fr/ukraine-2502 www.irsn.fr/ukraine-0703, www.irsn.fr/ukraine-1003

“ Les experts modélisent plusieurs scénarios : réacteur endommagé, atteinte d'une piscine de stockage...”

Santé



La cardiologie interventionnelle est utilisée ici lors d'une opération qui vise à fermer une communication anormale entre deux oreillettes du cœur chez un enfant.

Cardiologie interventionnelle Le risque est évalué chez l'enfant

Quel est le risque de cancer radioinduit chez les enfants ayant bénéficié d'un acte de cardiologie interventionnelle ?

L'analyse de la cohorte épidémiologique Coccinelle, initiée à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine), par le Laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants (Lepid), permet de les évaluer pour la période 2000 à 2013. Elle porte sur 17 000 enfants. Après exclusion de ceux porteurs d'un facteur de prédisposition, une première analyse montre que l'incidence de cancer ne diffère pas de la population générale. Aucune association significative entre dose à la moelle osseuse et cancer hématopoïétique n'est observée.

L'extension de la cohorte et son inclusion dans le projet européen Harmonic* vont augmenter la puissance statistique de l'étude.

Les anomalies cardiaques congénitales touchent environ 0,5 % des enfants à la naissance. La cardiologie interventionnelle est une méthode efficace et essentielle de leur diagnostic et traitement. Elle expose cependant le patient aux rayonnements ionisants.

* <https://harmonicproject.eu>

www Pour en savoir plus : Cohorte sur le risque de cancer après cardiologie interventionnelle pédiatrique (Coccinelle) www.irsn.fr/etude-coccinelle

Radioactivité dans l'environnement Quelle évolution ?

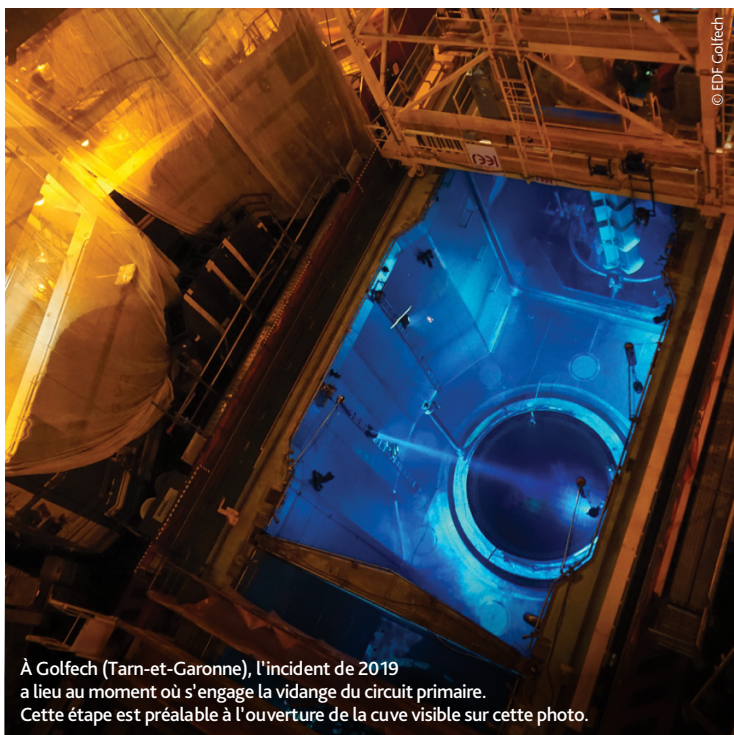
Selon le bilan de l'état radiologique de l'environnement français 2018-2020 édité par l'IRSN, les concentrations des radionucléides mesurées sur cette période – tritium, carbone 14... – sont de même niveau que celles relevées sur les périodes précédentes. Elles sont plus faibles autour de certains sites – Marcoule (Gard), Romans-sur-Isère (Drôme)... – en raison de la réduction de leurs rejets.

Ce document permet d'apprécier l'évolution de l'influence des rejets radioactifs des sites nucléaires. Il présente, pour la première fois, un chapitre relatif à des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), comme les sites de stockage de phosphogypses*. Les expositions potentielles des populations résultant de ces rejets sont très faibles. Les doses sont de l'ordre de 1 µSv/an, soit le millième de la limite d'exposition du public, fixée à 1 mSv/an. Ce bilan intègre les données collectées par le Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM).

* Liés à la production d'engrais phosphatés ou d'acide phosphorique, les phosphogypses concentrent la radioactivité naturellement présente dans les minerais de phosphates utilisés.

www Pour en savoir plus : Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2018 à 2020 www.irsn.fr/bilan-radiologique-2020

FAITS ET PERSPECTIVES



À Golfech (Tarn-et-Garonne), l'incident de 2019 a lieu au moment où s'engage la vidange du circuit primaire. Cette étape est préalable à l'ouverture de la cuve visible sur cette photo.

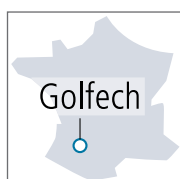


Les différents paramètres de la vidange du circuit primaire sont suivis depuis la salle de commande.

Incident à Golfech

Une analyse approfondie est réalisée

Que s'est-il passé lors de l'incident survenu à la centrale nucléaire de Golfech le 8 octobre 2019 ? L'Institut réalise une expertise technique et une analyse des facteurs organisationnels et humains. Ce travail conduit à des recommandations et des engagements de la part de l'exploitant : analyses, contrôles, surveillance...



Tout commence par un oubli.

L'événement du pressuriseur devait être ouvert ; il reste fermé.

Nous sommes le 8 octobre 2019. L'incident se produit lors d'une opération de vidange du circuit primaire d'un réacteur de la centrale de Golfech (Tarn-et-Garonne). Il est classé de niveau 2 sur l'échelle Ines¹. Que s'est-il passé ? Quelles sont les leçons tirées ?

Ce jour-là, le réacteur 2 est à l'arrêt pour cause d'opération périodique de renouvellement d'une partie du combustible. Pour effectuer le déchargement du cœur puis son rechargement, le circuit primaire principal (CPP) doit être vidangé. Le niveau d'eau dans le circuit doit être maîtrisé, il ne doit surtout pas trop baisser. Dans le cas contraire, cela pourrait conduire à la perte des moyens de refroidissement du combustible, entraîner son endommagement et des

rejets radioactifs dans l'atmosphère. Pour contrôler la vidange, un événement situé sur le CPP doit être ouvert, afin que la procédure s'effectue à pression atmosphérique.

L'absence d'ouverture n'est pas détectée

Le 8 octobre, l'activité de vidange du CPP est préparée. Mais l'équipe de conduite ne s'aperçoit pas que l'événement est laissé en position fermée et l'opération est engagée. La vidange du CPP – fermé et étanche – entraîne sa mise sous vide : la pression dans le circuit devient inférieure à la pression atmosphérique.

De nombreuses difficultés s'enchaînent pour les opérateurs, du fait notamment d'une erreur de configuration d'un capteur de niveau d'eau dans la cuve. Aucune des dispositions de maîtrise des risques, qu'elles soient humaines, organisationnelles ou techniques, comme le suivi des paramètres de la vidange – niveau d'eau dans le CPP,

volumes vidangés, etc. –, ne permet de repérer l'anomalie et d'empêcher cette mise sous vide pendant plusieurs heures. Le problème enfin décelé, le rétablissement de la situation est long et chaotique, avec des mouvements d'eau importants.

L'analyse approfondie de l'événement mobilise, pendant plus d'un an, une demi-douzaine d'experts de l'IRSN de différents domaines. Johann Deyris, ingénieur en sûreté des réacteurs à eau sous pression, examine la procédure de vidange, qui a évolué ces dernières années, et recherche les événements similaires survenus sur le parc électronucléaire français. Guillaume Larrignon et Cécile Deust, experts en conduite incidentelle et accidentelle, analysent la capacité de l'équipe de conduite à gérer la dégradation de la situation. Ils apportent un support sur la compréhension des phénomènes physiques (*voir infographie ci-contre*). En parallèle, Laure Rondeaux et Marie Leschaeve prennent en

compte dans leur analyse de l'évènement l'ensemble des dimensions humaines, organisationnelles et techniques. Ces deux spécialistes des facteurs organisationnels et humains (FOH) cherchent à mieux appréhender son contexte sociotechnique. En complément d'une analyse documentaire, cette démarche s'appuie sur vingt-cinq entretiens recueillis au cours d'une centaine d'heures passées auprès d'agents EDF du site et des services centraux.

Elle met en évidence plusieurs facteurs ayant conduit à cet incident sérieux. À la base il y a l'insuffisance de l'analyse de risque induit par l'évolution de la procédure de vidange. À cela s'ajoutent la déclinaison tardive et partielle d'une procédure nationale concernant cette opération et la réorganisation de la structure des équipes de conduite, engagée pour tenir compte du renouvellement massif des compétences chez l'exploitant.

Le recueil des données

La réalisation d'entretiens est une méthode de collecte nécessaire pour rassembler un maximum d'informations sur le contexte. Certains renseignements peuvent avoir un lien causal avec la fiabilité de l'activité, même s'ils se situent très en amont de l'évènement lui-même : management, climat social, préparation insuffisante des acteurs...

Les entretiens confrontent la vision théorique de l'organisation du travail avec les contraintes réelles. L'objectif est d'avoir une compréhension globale des facteurs expliquant la survenue de l'incident. Grâce à cette analyse pluridisciplinaire, les experts passent de ses causes apparentes – immédiatement visibles – à ses causes profondes.

Ils tirent des enseignements pour faire progresser la sûreté du parc français.

Des leçons sont tirées

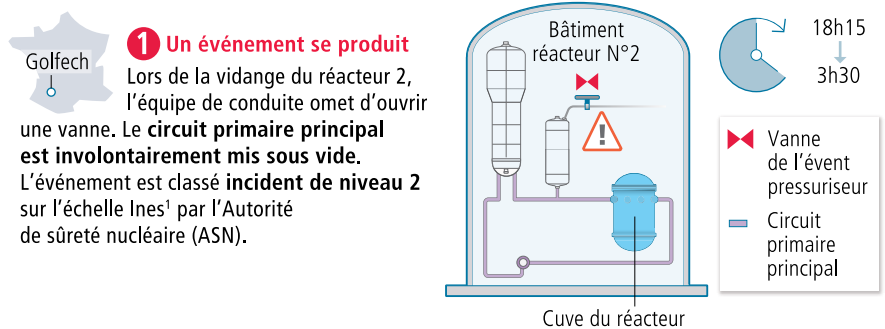
À la suite de l'expertise de l'IRSN, la direction d'EDF et la centrale de Golfech s'engagent à mettre en œuvre diverses actions techniques et organisationnelles pour fiabiliser les transitoires² dits sensibles³, notamment ceux de vidange du CPP.

L'un de ces engagements, accompli fin 2021, consiste à mener une analyse empirique sur un grand nombre de vidanges (*lire p. 8*). Objectif : préciser l'évolution attendue du niveau d'eau dans la cuve – dit niveau cuve – lors d'une vidange normale. Il s'agit de déterminer le critère d'identification d'une vidange sous vide.

PROCESS

Incident de Golfech : le simulateur Sofia utilisé pour mieux comprendre son déroulement

En 2019, un incident affecte la vidange d'un réacteur de la centrale de Golfech (Tarn-et-Garonne). Les experts s'appuient sur un simulateur pour comprendre l'évènement et repérer les facteurs techniques, humains et organisationnels en cause.



2 Il est analysé avec l'aide du simulateur Sofia

Le simulateur Sofia² utilisé en 2020 par les experts de l'IRSN à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine) reproduit de façon réaliste des incidents en calculant en temps réel les principaux paramètres d'une centrale : pression, température, débit... Une interface informatique remplace la salle de commande.



L'IRSN utilise le simulateur Sofia pour :

> Comprendre l'évènement

En le simulant, à partir des informations fournies par EDF : état initial, réponses des opérateurs, données chiffrées. Deux informations sont notamment recherchées : le niveau et la pression du circuit primaire.

> Mettre à l'épreuve le compte-rendu de l'évènement.

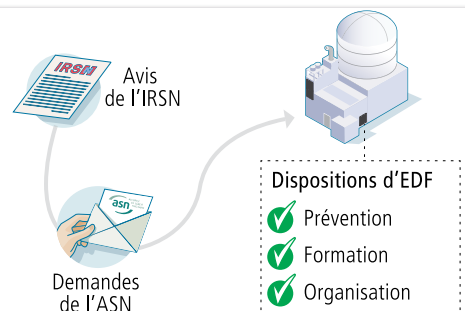
En reproduisant le scénario fourni par l'exploitant, Sofia aboutit aux mêmes paramètres que ceux relevés dans la centrale. Le Cres³ de l'énergéticien est validé.

> Estimer la gravité.

L'IRSN simule : que se serait-il passé si l'évènement avait été géré autrement ? Si telle action avait été exécutée plus tôt ou plus tard ? Verdict : la marge vis-à-vis de la perte de refroidissement était suffisante⁴.

3 L'imbrication de divers facteurs à l'origine de l'incident est mieux comprise

L'IRSN fournit un avis courant 2021⁵. Il met en évidence les diverses causes de l'incident. Plusieurs lignes de défense techniques, humaines et organisationnelles sont fragilisées. EDF s'engage à mettre en place de nombreuses actions pour fiabiliser la vidange du circuit primaire.



1. International Nuclear Event Scale.

2. Simulateur d'observation du fonctionnement incidentel et accidentel.

3. Cres : compte rendu de l'évènement significatif.

4. Perte du système d'évacuation de la puissance résiduelle à l'arrêt.

5. Avis IRSN n° 2021-00086.

FAITS ET PERSPECTIVES



Les salariés d'EDF sont formés sur un simulateur de pilotage, réplique à l'identique de la salle des commandes des réacteurs.

© Romah Beaumont/EDF

Les services centraux de l'industriel s'engagent aussi à renforcer la surveillance du niveau cuve lors de chaque vidange. Ceci fiabilise la valeur de ce niveau, sur laquelle sont basées des parades essentielles au risque de découverte du cœur. Parmi ces parades, les ordres d'injection de sécurité permettent d'injecter rapidement de grandes quantités d'eau dans le circuit primaire pour compenser une baisse trop brutale de niveau.

Localement, l'exploitant de Golfech prévoit de mettre en œuvre un contrôle technique afin de garantir – avant le démarrage de la vidange du CPP – la disponibilité du capteur de niveau cuve pour détecter rapidement une éventuelle mise sous vide. Cette mesure est appliquée avec succès depuis l'arrêt de tranche de mai 2021.

L'IRSN propose d'aller plus loin. Il recommande de renforcer des échanges entre les services centraux d'EDF et les sites, comme de mettre à jour la documentation sur certaines activités dites sensibles, comme la vidange du CPP. L'analyse approfondie et multidisciplinaire de l'Institut sur cet incident vise à fiabiliser la vidange du CPP. ■

1. *Échelle internationale des événements nucléaires et radiologiques (International Nuclear Event Scale).*
2. *Variation de certains paramètres physiques intervenant entre deux régimes de fonctionnement stationnaires d'une installation.*
3. *Dit pour un transitoire quand un paramètre représentatif d'une fonction de sûreté varie de manière significative au cours de ce transitoire, que le dépassement des limites prévues a des conséquences importantes pour la sûreté et que les lignes de défense pour maintenir l'installation dans un domaine d'exploitation sont humaines.*

www Pour en savoir plus :
Avis illustré et commenté sur l'évènement
www.irsn.fr/Avis-commentaire-2021-86

Quelle est l'origine principale de l'incident de Golfech ?

L'évènement du 2019 montre un défaut de culture de sûreté. Plusieurs lignes de défense – attitude interrogative, gestion d'un fortuit, prise de décision – n'ont pas fonctionné, d'où son classement au niveau 2 de l'échelle Ines¹. Il nous interpelle sur les fonctionnements organisationnels et humains (FOH), autant que techniques.

Sur quoi EDF a-t-elle travaillé depuis ?

Plusieurs organisations et comportements sont réaffirmés. Les opérateurs doivent adhérer

totallement aux procédures. En cas d'interruption inopinée d'une activité sensible, telle la manipulation de vannes – l'opérateur est interpellé, il s'arrête... –, une minute de pause pour se reconcentrer est instituée pour fiabiliser le processus. L'analyse de l'organisation des équipes de conduite a montré qu'il faut clarifier les rôles et les responsabilités. Notre analyse FOH a tiré de nombreuses leçons de cet évènement... mais seulement mi-2020. Ce délai nous incite à améliorer l'efficacité de notre retour d'expérience.

Quelles sont les suites ?

Nous avons analysé deux cents vidanges du circuit primaire afin de mieux comprendre et maîtriser le transitoire² (lire p. 6). Il en résulte un nouveau guide, sorti en 2022. La transmission de ces connaissances approfondies est engagée vers les formateurs et les équipes opérationnelles. Avec les formations de recyclage annuelles, ce savoir va diffuser à tous les opérationnels et se pérenniser. C'est capital pour combattre l'érosion des compétences. Notre étude technique sera partagée avec l'Institut et l'Autorité de sûreté nucléaire.

3 questions à...

Lise Palacios

Experte fonctionnement et conduite à l'Unité nationale d'ingénierie d'exploitation, EDF



© Coll. part



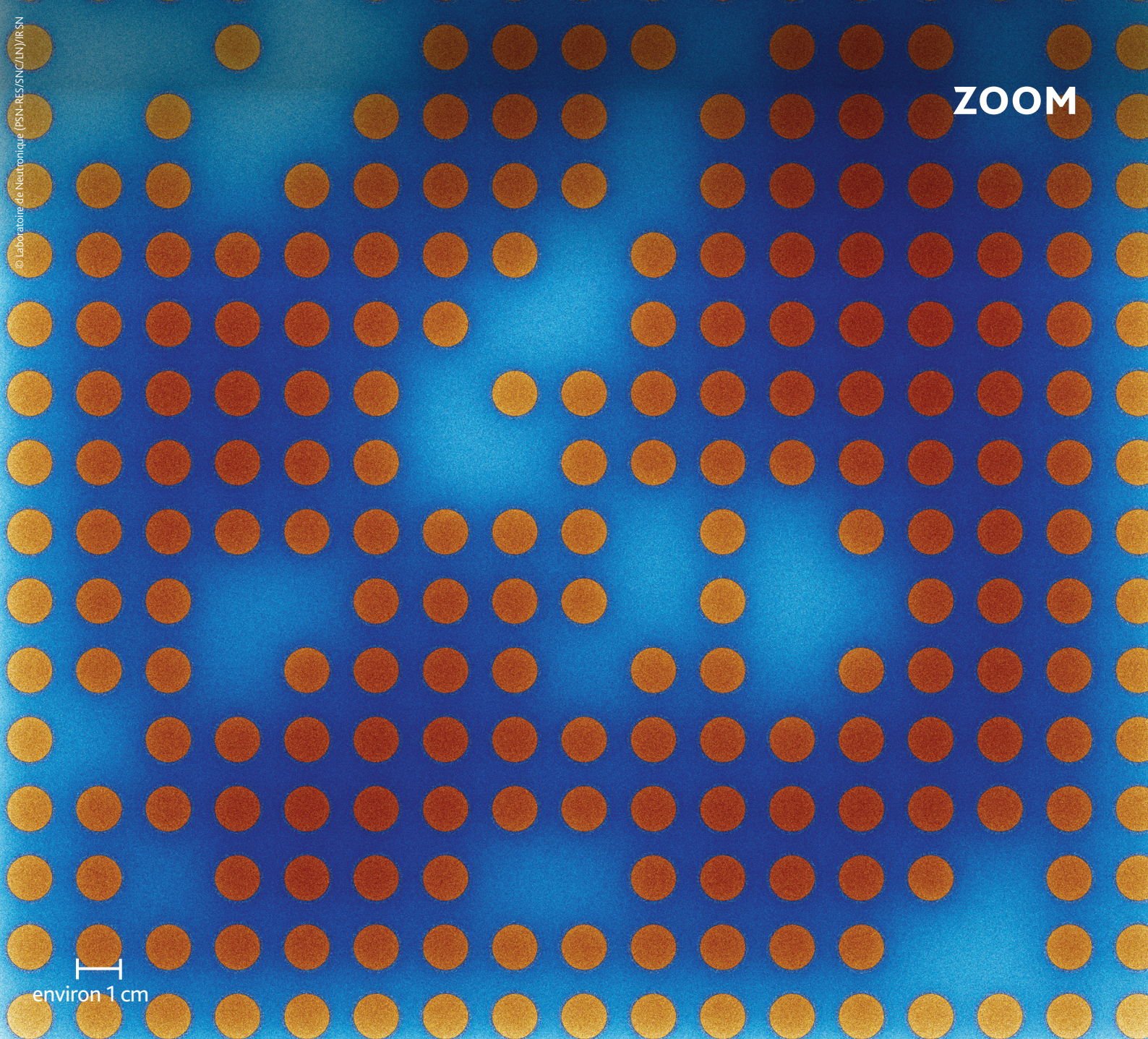
L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) opère sous l'égide de l'ONU depuis 1957.

AILLEURS

Les déclarations à l'international

À la suite de l'évènement survenu en 2019 à la centrale de Golfech, (Tarn-et-Garonne) l'IRSN choisit de faire une déclaration à la base de données internationale IRS (International Reporting System). Il présente à tous les membres de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) les enseignements tirés pour le reste du parc nucléaire français. L'objectif est de sensibiliser les homologues étrangers aux causes profondes de l'incident, d'identifier les enseignements transposables sur leurs

réacteurs et de déployer des actions correctives, afin qu'un évènement similaire ne se produise pas. Des échanges ont lieu avec d'autres instances internationales, comme le groupe de travail sur le retour d'expérience d'exploitation de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE). La France est l'un des trente-sept États membres contribuant à la base IRS. L'Institut sélectionne les évènements – une dizaine par an – jugés les plus enrichissants.



environ 1 cm

Jeu de go

Vous croyez voir un plateau de jeu de société ? Vous êtes loin de la réalité. Vous observez le résultat d'une simulation numérique de la population de 80 millions de neutrons dans un assemblage combustible d'un réacteur nucléaire entreposé en piscine de désactivation. Parmi les 289 crayons constituant l'assemblage, 37 manquent.

Chaque pixel de l'image est le résultat d'une statistique : le nombre et la vitesse des particules passées en ce point. Le bleu représente les neutrons modérés, c'est-à-dire

ralentis par l'eau. Plus la nuance est claire, plus ils sont nombreux. Les neutrons non modérés sont en orangé. Les réactions de fission dans un combustible dépendent de multiples facteurs interdépendants dont la modération. Quand des assemblages avec des crayons manquants sont entreposés dans une piscine pour les refroidir, l'eau occupe l'espace libéré. Ceci augmente le risque de déclencher une réaction en chaîne incontrôlée – l'accident de criticité –, aux conséquences radiologiques très graves pour les travailleurs à proximité.

Benjamin Dechenaux

Chercheur en neutronique

Pour étudier ce risque, l'IRSN utilise des logiciels pouvant résoudre de manière stochastique l'équation régissant le comportement des neutrons.

Les chercheurs du Laboratoire de neutronique à Fontenay-aux-Roses, dans les Hauts-de-Seine, utilisent cette simulation pour mieux comprendre les mécanismes de ces chaînes de fission auto-entretenues. L'objectif est de fournir aux experts en sûreté des outils performants et prédictifs lorsqu'ils analysent ce risque dans les dossiers des exploitants nucléaires. ■



Pour traiter en urgence un accident vasculaire cérébral, le médecin cherche à enlever un caillot. Cette procédure réalisée par voie endovasculaire, sous contrôle radioscopique, expose le praticien aux rayonnements ionisants.

7 dépassements

de valeurs limites d'exposition (VLEP) sont relevés en 2020 par le Bureau d'analyse et de suivi des expositions professionnelles (Basep) qui gère la base Siseri.

Exposition aux rayonnements

Le suivi des professionnels est optimisé

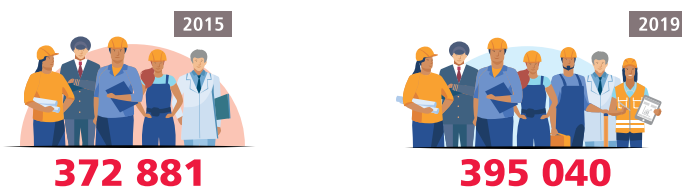
Les indicateurs d'exposition des professionnels aux rayonnements ionisants restent stables. La connaissance du risque progresse et se renforcera encore après la refonte du système de surveillance dédié. L'épidémiologie réalise un suivi des secteurs à risque. Tour d'horizon.

EN CLAIR

2015-2019 : quelles évolutions de la radioprotection des travailleurs ?

Plus de 20 000 professionnels exposés aux rayonnements ionisants supplémentaires sont suivis depuis 2015. Zoom sur quelques chiffres clés*.

Plus de travailleurs suivis au cours de l'année



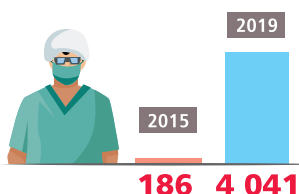
Les secteurs d'activité des professionnels sont mieux connus

Domaine d'activité, métier du travailleur, etc., la méthodologie du recueil de données a changé en 2018, apportant une amélioration de leur qualité et de leur complétude, en témoigne l'évolution de la part des travailleurs dont l'activité est connue.



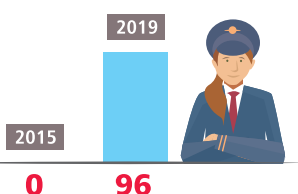
Le nombre de professionnels suivis pour l'exposition du cristallin augmente

En cause : en 2018 la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) diminue et passe de 150 à 20 mSv/an.



Le nombre de personnels navigants recevant une dose annuelle supérieure à 5 mSv croît

En cause : la mise en service de gros porteurs longs courriers de type A380, asservis par moins d'équipes, volant plus près des pôles.



* En raison de la pandémie de la Covid-19, l'année 2020 n'est pas prise en compte.

Source : bilans IRSN 2015 et 2020 des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants.

Transporteur de sources radioactives, dentiste, travailleur du nucléaire...

En 2020, 387 452 professionnels exposés aux rayonnements ionisants ont fait l'objet d'un suivi dosimétrique, révèle le dernier bilan travailleurs 2020 de l'IRSN. Ce document identifie les secteurs et métiers les plus exposés et présente des études ciblées afin de mieux comprendre les risques. *Repères* fait le point sur la radioprotection des travailleurs et les moyens mis en œuvre pour la renforcer.

« *Nous observons une hausse de l'effectif suivi de 1 à 3 % par an*¹. » En quelques mots, Juliette Feuardent, experte en radioprotection, résume un des enseignements des derniers bilans annuels. Hors effets de la pandémie¹, les variations annuelles d'exposition collective reflètent les fluctuations d'activité du nucléaire : « *Lorsque les opérations de maintenance sont nombreuses, la dose augmente* », décrypte-t-elle. Ainsi la forte baisse de la dose collective en 2020 – moins 35,5 % – reflète essentiellement la réduction de ces travaux. Elle est aussi liée à l'importante diminution des doses des personnels navigants (PN), car la pandémie a fait chuter le trafic aérien.

Zoom sur les professionnels de santé

Le bilan 2020 propose des focus thématiques. L'un s'intéresse à l'exposition du cristallin – la lentille naturelle de l'œil – dans le médical. À la suite de l'abaissement du seuil réglementaire à 20 mSv, les effectifs suivis pour la dosimétrie de cet organe sont multipliés par plus de vingt depuis 2015 (*voir ci-contre, lire p. 13*). Les doses individuelles moyennes au cristallin montrent que les radiologues interventionnels² sont les plus exposés. Depuis 2017, grâce au projet européen Medirad, l'IRSN explore l'efficacité des protections radiologiques individuelles (PI) disponibles. « *Plusieurs études épidémiologiques montrent un risque accru de cataractes radio-induites et suggèrent aussi davantage de risque de tumeurs au cerveau possiblement radio-induites* », expose Christelle Huet,



En permanence dans le cockpit, les pilotes sont la catégorie de personnel navigant la plus exposée.



Sas de confinement pour un chantier de démantèlement présentant de la contamination alpha.

“ Le suivi de travailleurs améliore la radioprotection.

chercheuse au Laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants (LDRI). Le LDRI étudie³ l'efficacité de plusieurs PI : visière, calot, tablier et drap plombés et non plombés, système suspendu Zero-Gravity⁴. Le laboratoire recourt à la simulation pour évaluer la réduction de dose au niveau de certains organes. « Nous modélisons une installation de radiologie interventionnelle et simulons une procédure de cardiologie interventionnelle. Nous calculons la dose avec et sans PI au niveau du cristallin et du cerveau. Des mesures sont également réalisées à l'aide de dosimètres dans des fantômes simulant les médecins ou portés par eux. » Les deux approches se complètent pour identifier ce qui influence l'efficacité d'une PI. En 2021, le système Zero-Gravity s'avère* le plus efficace : il réduit la dose aux organes couverts d'un facteur sept environ.

Reconstituer des années de vol

Le bilan analyse le cas des PN. Si la proportion de ceux recevant plus de 5 mSv par an est faible, elle croît chaque année, sauf en 2020 avec la pandémie. Pour comprendre les effets du rayonnement cosmique, le Laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants (Lepid) bâtit la cohorte Space avec Air France et Santé publique France. C'est un défi, car il s'agit de reconstituer les doses de 30 000 PN depuis les années 1970. « Cette étude compare l'état de santé des PN avec celui de la population générale », précise Klervi Leuraud, épidémiologiste.

Un autre programme avec Air France collecte des données pendant des éruptions solaires. « Les éruptions affectant le débit de dose aux altitudes de vol sont peu fréquentes et ne durent que quelques heures », précise François Trompier, ingénieur chercheur. Depuis 2013,

0,78 mSv

C'est la dose individuelle annuelle moyenne d'exposition externe sur l'effectif exposé en 2020.

jusqu'à 35 avions mesurent en continu ces rayonnements à l'aide de dosimètres électroniques. Dans les jours suivant une éruption, l'outil Sievert PN sera, le cas échéant, corrigé avec ces données et les doses de l'équipage réévaluées finement (lire p. 13).

Depuis 2019, le projet de sciences participatives Cosmic on Air* complète le dispositif.

Nucléaire : l'exposition chronique

En 2020, comme en 2019, il n'y a pas de dépassement de la limite réglementaire annuelle de 20 mSv pour le secteur nucléaire. En revanche, la dose collective avait augmenté de 8,3 % en 2019, en raison des maintenances plus nombreuses. Pour connaître les risques de ces faibles doses, le Lepid suit la cohorte nationale Seltine, soit 80 000 travailleurs dans ce secteur. Les premiers résultats* montrent une augmentation significative du risque de leucémie myéloïde. Le suivi continue. Seltine intègre la cohorte internationale Inworks, qui compte plus de 308 000 travailleurs du nucléaire. D'ici trois ans, les différentes études livreront de nombreux résultats. De quoi renforcer les pratiques et normes de radioprotection. ■

1. Le nombre d'analyses a chuté de 14 % en 2020 par rapport à 2019, pour le suivi de l'exposition interne.
2. Un radiologue interventionnel réalise des actes diagnostiques ou thérapeutiques sous guidage fluoroscopique avec rayons X.
3. Collaboration avec deux instituts européens (SCK-CEN, Belgique, et Nofer, Pologne).
4. Combinaison plombée suspendue.

* Voir les références bibliographiques et webographiques p. 16.

WEBMAGAZINE

À LIRE

Radioprotection : nouveaux besoins, nouvelles solutions

www.irs.fr/R32

La collecte de données est capitale pour la radioprotection

Les données sur l'exposition aux rayonnements ionisants conditionnent le suivi des professionnels concernés et alimentent les études épidémiologiques. Elles sont essentielles pour sensibiliser les travailleurs, identifier les activités à risque et faire évoluer la réglementation. Comment sont-elles recueillies ?

Pour établir chaque année une photographie fidèle des expositions des travailleurs, l'IRSN exploite diverses bases de données, à commencer par le Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants (Siseri). Recueillir les mesures issues de la dosimétrie et du calcul, récupérer les informations liées au contexte du travail, sont des étapes déterminantes. Deux méthodologies président à l'acquisition des données du Bilan des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants en France : le recours à Siseri et des questionnaires transmis par des laboratoires d'analyse accrédités. Ces approches sont liées à l'origine du rayonnement ionisant – externe ou interne – auquel sont soumis les travailleurs.

Le calcul et la dosimétrie

Les expositions externes sont mesurées à l'aide de dosimètres individuels à lecture différée. L'employeur les achète à l'un des sept organismes accrédités et les fournit à ses employés.

Selon la durée du port, la société renvoie les dosimètres à cet organisme mensuellement ou trimestriellement. Celui-ci transmet le relevé à l'IRSN pour intégration à Siseri. Cette base nationale – mise en place en 2005 et gérée par le Bureau d'analyse et de suivi des expositions professionnelles



Un modèle numérique estime les doses auxquelles sont susceptibles d'être exposés les égoutiers et les personnels de stations de traitement des eaux usées.

(Basep) – centralise, consolide et conserve l'ensemble des résultats de la surveillance dosimétrique individuelle des travailleurs. Les dosimètres ne sont cependant pas des plus pertinents pour certains professionnels. C'est le cas des personnels navigants (PN), exposés au rayonnement cosmique.

« Les dosimètres ont une limite de détection, ils n'enregistrent pas toute la dose, explique François Trompier, spécialiste en dosimétrie des rayonnements ionisants. Ils doivent aussi passer les contrôles bagages et peuvent être perdus... » Les doses reçues ne sont donc pas mesurées, mais calculées avec l'outil Sievert PN¹ (voir webmag), opérationnel depuis le début des années 2000. « En tout point de l'atmosphère, on peut calculer un débit de dose efficace et donc la dose intégrée pendant le vol. C'est plus précis que si elle était mesurée. » Calculées par le Laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants (LDRI) sur la base des fichiers de PN et des vols, ces doses sont ensuite versées dans la base Siseri.

« Pour établir le bilan annuel, les données relatives à l'exposition externe sont directement extraites des informations présentes dans Siseri », indique Philippe Lestaavel,

ingénieur-chercheur, coordonnateur du bilan. Pour l'exposition interne – le radioélément est incorporé dans l'organisme par inhalation, ingestion ou blessure –, la méthodologie diffère. La base nationale n'est pas mise à contribution, du moins pas encore.

Acteur clé : le médecin du travail

Le suivi repose sur des examens prescrits par le médecin du travail : des analyses radiotoxicologiques – selles, urines – et anthroporadiométriques (voir webmag). La surveillance est mensuelle, semestrielle ou annuelle. En cas de suspicion de contamination, la médecine du travail demande des examens en urgence. Toutes les analyses sont effectuées par des laboratoires de biologie médicale et les services de santé au travail accrédités, chargés d'intégrer les résultats dans la base Siseri.

« Le médecin du travail est le pivot du dispositif de suivi de la radioprotection », note Philippe Lestaavel. Réglementairement, il lui incombe de calculer la dose interne – dose efficace engagée² – à partir des analyses (lire p. 16). L'outil Miodose, développé par l'IRSN en partenariat avec Orano, à partir de 2007, l'aide pour ce calcul. Le médecin renseigne

DOSSIER

dans Miodose les résultats d'analyses, le radionucléide en cause, sa forme physico-chimique (aérosol, vapeur...), etc. Le logiciel calcule alors la dose interne. « *Lorsqu'elle est supérieure au quart de la limite réglementaire, nous sollicitons l'avis d'experts de l'IRSN pour confirmer notre calcul* », précise Lise Carbone, médecin du travail au CEA Marcoule (Gard).

Le bilan travailleur ne se fonde pas sur Siseri pour l'exposition interne. « *Le taux de renseignement des données dans la base est insuffisant. Nous utilisons donc des questionnaires* », explique Philippe Lestaavel. Les laboratoires d'analyses accrédités, une quinzaine, remplissent chaque année un document qu'ils renvoient au Basep. D'ici deux ou trois ans, la méthodologie pourrait changer et reposer, comme pour l'exposition externe, sur la base de données. En 2022, la refonte du système devrait faciliter son utilisation. « *Elle simplifiera le travail de tous les utilisateurs : employeurs, laboratoires accrédités...* », résume Juliette Feuardent, experte en radioprotection à l'IRSN.

Les données accessibles

Autre évolution majeure : le travailleur pourra consulter ses données dosimétriques. Aujourd'hui, seules certaines personnes y accèdent : médecin du travail, conseiller en radioprotection (CRP)... « *Actuellement, pour connaître son historique, un travailleur doit nous le demander. La refonte lui donnera un accès spécifique. C'est un changement de philosophie important* », souligne l'experte. Les informations fournies par les employeurs sont un autre facteur déterminant du bilan annuel. Ils doivent renseigner dans Siseri des informations administratives de

leurs employés et le contexte de l'exposition : c'est une obligation réglementaire. « *Ces informations nous servent à classer le travailleur : secteur d'activité, métier, statut d'emploi... Cela permet une analyse plus fine*, expose Philippe Lestaavel. *Parfois ces items manquent, notamment dans l'industrie non nucléaire, où la culture de radioprotection est moins ancrée. Nous contactons alors les employeurs pour améliorer le recueil.* »

Les taux de remplissage de ces données sont passés de 50 à 67 % en cinq ans. La refonte devrait encore l'améliorer.

Vigilance et alerte

« *Nous examinons la base toutes les semaines*, explique Juliette Feuardent. *Pour un travailleur donné, c'est parfois le cumul de doses mesurées par plusieurs laboratoires qui permet de constater le dépassement. Cela ne se voit que dans Siseri.* »

Les focus qui complètent le bilan – les études ciblées – recourent aussi à d'autres sources. En 2019, une collaboration entre l'IRSN et l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) alimente un focus sur la médecine nucléaire. « *Nous avons utilisé des questionnaires que l'ASN avait transmis à tous les hôpitaux ayant un service de médecine nucléaire* », dit Philippe Lestaavel. La même année, une étude sur les transporteurs de médicaments radiopharmaceutiques révèle quatre dépassements de la limite réglementaire de dose de 20 millisieverts (mSv) en trois ans. « *Ces focus tirent le signal d'alarme : dans tel secteur, tel métier, les doses ont tendance à augmenter* », raconte Philippe Lestaavel.

Dans le bilan 2020, le focus sur les PN met en évidence une hausse du pourcentage de travailleurs recevant une dose supérieure à

5 mSv en quatre ans (voir infographie p. 11). « *Nous avons échangé avec Air France. Cette augmentation s'expliquait par la mise en service d'avions gros porteurs long-courriers*, relate Juliette Feuardent. *Nous avons suggéré de mettre en place un système de rotation, afin que les pilotes les plus exposés empruntent parfois des voies où l'exposition est moindre.* »

De l'épidémiologie à la réglementation

Alimentées par les données de cette base nationale, les études épidémiologiques explorent des situations spécifiques, comme des expositions chroniques à de faibles doses. Menée entre 2009 et 2014 par le Laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants (Lepid), l'étude O'cloc fait l'objet d'un focus dans le bilan 2020. Elle porte sur le risque d'opacité du cristallin chez les cardiologues interventionnels, qui réalisent des radios répétées pour guider leur geste diagnostique. « *Quand l'étude a débuté, ils n'étaient pas au courant du risque radiologique et ne protégeaient pas leurs yeux* », raconte Marie-Odile Bernier, épidémiologiste au Lepid.

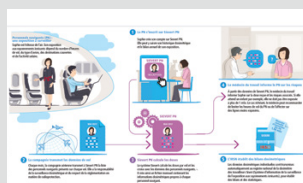
À l'époque, Sophie Jacob, épidémiologiste, compare les informations d'une centaine de praticiens interventionnels à celles de témoins non exposés. À l'aide de questionnaires, elle recense le nombre de procédures, les moyens de protections. À partir de données de la littérature, elle déduit la dose reçue à l'organe pour chaque type de procédure... « *Son étude montre un risque accru de cataracte, possiblement associée aux radiations**, se souvient Marie-Odile Bernier. *Nous avons sensibilisé ces professionnels.* »

En 2011, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) revoit ses

WEBMAGAZINE



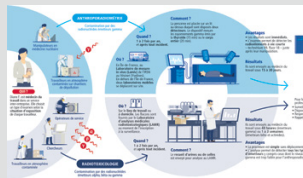
À LIRE
Bien choisir
son dosimètre
www.irsn.fr/R38



À LIRE
Sievert PN aide
le personnel
navigant
www.irsn.fr/R34



À LIRE
Cidre : l'exposition
des égoutiers
www.irsn.fr/R37



À LIRE
Anthroporadiométrie
ou radiotoxicologie ?
www.irsn.fr/R42

À LIRE La réforme du système Siseri www.irsn.fr/R51

recommandations, s'appuyant sur plusieurs études épidémiologiques. La limite annuelle d'exposition au cristallin passe de 150 à 20 mSv (lire p. 11). Le Lepid a depuis lancé une autre étude, O'ricams*. Elle suit 200 000 travailleurs médicaux français – radiologues, médecins nucléaires, manipulateurs en radiologie, etc. – exposés à de faibles doses de rayonnements. « *Nous voulons analyser le risque de cancer radio-induit, en particulier celui du cerveau et connaître les postes les plus à risque* », expose Marie-Odile Bernier.

Rétrospective, l'étude O'ricams nécessite de reconstituer l'historique dosimétrique des centaines de professionnels, un travail colossal. Une thèse en cours réalisera une première analyse de la mortalité et comparera les doses reçues par les travailleurs décédés d'une tumeur cérébrale à celles de témoins vivants et sans tumeur. Les résultats sont attendus d'ici deux ans.

Les égoutiers sous les radars

Certains travailleurs, potentiellement exposés aux rayonnements, restent invisibles pour la surveillance dosimétrique et le bilan. C'est le cas des égoutiers et des personnels de stations de traitement des eaux usées, soumis aux rejets des services de médecine nucléaire et dans une moindre mesure, des laboratoires de recherche manipulant de la radioactivité. Vraisemblablement exposés en dessous du seuil réglementaire, ces agents ne portent pas de dosimètres. Le risque qu'ils encourent doit être précisé.

Le modèle numérique Cidre³ répond à ce besoin (voir webmag). Il estime les doses susceptibles d'être reçues dans les réseaux d'assainissement et les stations d'épuration.

In fine, Cidre peut être complété par une étude d'impact plus précise. Si dans une station de traitement donnée, Cidre estime que l'exposition dépasse 1 mSv/an, une caractérisation spécifiques du site sera nécessaire. « *Elle permet de considérer des éléments non pris en compte par le modèle, comme les fosses toutes eaux qui atténuent l'exposition* », précise Éric Blanchardon, expert en dosimétrie interne. Quant aux mesures de radioprotection à instaurer, elles concerneraient surtout les émetteurs. « *L'installation de cuves de décroissance dans les services de médecine nucléaire pour récupérer les urines de patients traités par de nouveaux médicaments radiopharmaceutiques – comme le lutétium 177 – est une piste* », conclut-il. ■

1. www.sievert-system.org

2. Quantité d'énergie déposée dans le corps par le radionucléide, pondérée selon la radiosensibilité des organes. Elle mesure le risque d'apparition de cancer radio-induit.

3. Calcul d'impact des déversements radioactifs dans les réseaux.

* Voir les références bibliographiques et webographiques p. 16.

PROCESS

Dosimétrie travailleurs

L'intercomparaison fiabilise le suivi



Les résultats de la dosimétrie externe et interne* des travailleurs doivent être fiables. Pour ce faire, la réglementation oblige les laboratoires accrédités les fournissant à participer tous les trois ans aux intercomparaisons. Surveiller la qualité de leurs mesures est un gage de qualité pour le suivi de l'exposition professionnelle. L'IRSN organise une session par an.

Pour les analyses radiotoxicologiques de selles ou d'urines, le Service de mesure des expositions aux rayonnements ionisants (Smeri) au Vésinet (Yvelines) envoie aux participants un échantillon dont il connaît l'activité radioactive. Les laboratoires rendent leur mesure. Si l'anthroporadiométrie

repose globalement sur le même principe – mesure des rayons gamma émis par les éléments radioactifs –, ici c'est un fantôme qui est fourni. « *Des briques superposées forment un corps humain contenant des sources radioactives d'une activité connue*, détaille Alain Savary, spécialiste de métrologie au Smeri. *Nous vérifions la conformité des résultats rendus selon des critères définis.* » Les intercomparaisons sont menées sur deux autres géométries : thyroïde et poumon. En dosimétrie externe, c'est le Laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants (LDRI) à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine) qui pilote ces comparaisons. Il irradie sur des installations de référence les dosimètres fournis par les participants. Ces derniers rendent les mesures lues. Un rapport est émis après l'intercomparaison. En cas de signaux « d'alerte » ou « d'action », le participant est invité à réaliser une investigation approfondie et à corriger le problème.

* Les résultats de mesures internes s'expriment en becquerel. Le médecin du travail les convertit ensuite en dose (lire p. 11 et 16).



Pour en savoir plus : Comparaisons interlaboratoires en dosimétrie interne <https://cildi.irsn.fr>; cildi@irsn.fr

NORMES

Dosimétrie neutrons

La mesure devient plus représentative

Fabrication et retraitement du combustible, décontamination des châteaux de transport...

Des dizaines de milliers de travailleurs, principalement dans des secteurs liés au nucléaire, sont exposés au rayonnement neutronique en France.

Depuis 2015, la norme ISO 21909-1:2015 améliore leur suivi. « *Les dosimètres passifs certifiés répondent à des exigences plus fortes, les tests de performance auxquels ils sont soumis correspondant mieux aux situations d'exposition* », indique Marie-Anne Chevallier, spécialiste en dosimétrie externe, impliquée dans la révision de la norme aux côtés de François Quéinnec, expert en radioprotection, responsable du projet.

Ce remaniement débute en 2012, initié par un consensus international de spécialistes au sein de l'Organisation internationale de normalisation (ISO). La norme de 2005 définissait des exigences différentes pour chacune des grandes technologies de dosimétrie. « *Il était difficile de les comparer. Leurs fonctionnements, comme les exigences de performance de chacune d'elles, différaient,*

se souvient la spécialiste. *Un document plus universel, décrivant des tests et des exigences indépendants de la technique, était nécessaire.* »

Une autre raison motive la révision. En 2005, les tests exigés ne sont pas représentatifs – ni en énergie, ni en niveaux de dose – des réalités du terrain.

Or les champs neutroniques sont très variables d'un poste à l'autre : de haute énergie pour certaines sources de radionucléides, versus de plus basse énergie dans l'industrie du nucléaire...

« *La nouvelle norme ajoute des tests pour une quinzaine de configurations – énergies et angle d'incidence – et à des niveaux de dose proches du seuil d'enregistrement.* » La série complète de la norme 21909 (parties 1 et 2) est disponible depuis fin 2021.



Pour en savoir plus : Systèmes dosimétriques passifs pour les neutrons ISO 21909:2021 (parties 1 et 2) www.iso.org/fr/standard/78756.html www.iso.org/fr/standard/75125.html



1 La contamination s'est produite sous la hotte, alors que le travailleur manipulait un produit radiomarqué.

2 Le Laboratoire d'analyses médicales radiotoxicologiques de l'IRSN (LAMR) situé au Vésinet (Hauts-de-Seine), effectue des mesures par spectrométrie gamma des échantillons d'urine.

REPORTAGE L'été dernier, un travailleur se contamine avec de l'iode 125 dans un laboratoire de l'Université Clermont Auvergne (Puy-de-Dôme). Le médecin du travail sollicite l'IRSN. Récit.

Incident de radioprotection Évaluer au mieux la dose reçue

Clermont-Ferrand, le 2 juin 2021. Dans le Laboratoire d'imagerie moléculaire et stratégies théranostiques* (IMoST, unité mixte Université Clermont Auvergne, Inserm), un radiochimiste manipule un produit marqué à l'iode 125. Il porte des gants. Pourtant, au moment du contrôle quotidien de non-contamination, le contaminomètre détecte de la radioactivité sur l'extrémité d'un de ses doigts.

« Il a jugé la contamination minime et ne nous a pas alertés tout de suite », raconte Valérie Lucas, médecin du travail à l'université. Mais la contamination persiste. Quelques jours plus tard, l'agent signale l'incident aux conseillers en radioprotection (CRP), qui alertent la médecine du travail.

Quelle conduite tenir ?

Valérie Lucas contacte immédiatement l'IRSN. « Elle nous a demandé des conseils sur les examens à réaliser pour évaluer l'exposition », se souvient Cécile Challeton de Vathaire, experte en dosimétrie interne au Service de recherche en dosimétrie (Sdos). Des traitements locaux – tels les pansements d'argile – sont préconisés pour éliminer la contamination résiduelle du doigt.

Y a-t-il eu contamination interne ? Le Sdos conseille une anthroporadiométrie de la thyroïde et un examen radiotoxicologique des urines, à réaliser au Vésinet (Yvelines), au Service de mesure des expositions aux rayonnements ionisants (Smeri).

« L'agent n'a pas souhaité faire l'examen thyroïdien, mais il a réalisé deux prélèvements urinaires sur vingt-quatre heures », relate Valérie Lucas. Les CRP

envoient régulièrement à l'Institut les mesures relevées au niveau du doigt.

Réglementairement, le médecin du travail calcule la dose interne. « Mais il n'a pas toujours les outils pour le faire », remarque Cécile Challeton de Vathaire.

Le calcul de dose

L'IRSN apporte alors son concours pour estimer cette dose avec le logiciel Miodose, développé en partenariat avec Orano (lire p. 13).

La dose efficace engagée est estimée à environ 4 mSv. Celle à la peau, à plus de 200 mSv.

Le 6 juillet, le médecin en informe l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). La dose à la peau dépassant le quart de celle annuelle autorisée, l'incident est classé au niveau 1 sur 7 de l'échelle internationale de gravité des événements nucléaires et radiologiques, Ines.

Le radiochimiste passe en catégorie A, il bénéficie d'un suivi médical plus étroit pendant un an.

Médecin et conseiller engagent des mesures correctives. « La hotte accueillant les manipulations avec l'iode 125 est étanchéifiée et sa ventilation améliorée. Les déchets sont placés dans une zone ventilée », détaille Arnaud Briat, CRP à l'Université Clermont Auvergne.

Le retour d'expérience sur l'incident est partagé et les règles de radioprotection rappelées en réunion d'équipe. « Plusieurs procédures n'avaient pas été respectées, se souvient Arnaud Briat, comme la double paire de gants. Nous avons aussi insisté sur la nécessité de faire une déclaration immédiate. » ■

* Nouvelle approche médicale combinant en simultanément des aspects diagnostiques et thérapeutiques.

■ BIBLIOGRAPHIE

Repères n°32, février 2017
Radioprotection : les solutions s'adaptent aux nouveaux besoins
www.irsn.fr/R32

* Voir articles p. 11 à 15
Jacob S. et al. (2013) Int J Cardiol.
Dabin J. et al. (2021) Report on effectiveness of protective devices for staff in interventional procedures
Leuraud K. et al. (2017) Radioprotection

Bilans des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants en France 2020
<https://expro.irsn.fr/>
Cohorte O'Ricams
www.irsn.fr/oricams
Toutes les études et cohortes du Lepid
www.irsn.fr/lepid
Cosmic on air
<https://cosmic-on-air.org/>
Openradiation
www.openradiation.org
SievertPN
www.sievert-system.org/



Initier, préparer, déployer, consolider : le guide pour l'appropriation d'un changement technique du matériel en radiothérapie préconise de procéder selon ces quatre étapes.

Changement de techniques et de matériels

Un guide accompagne les professionnels en radiothérapie

L'ESSENTIEL En radiothérapie, les techniques de traitement, comme les équipements, évoluent rapidement. Comment aider les équipes à s'adapter pour sécuriser ce changement ? Le guide pour l'appropriation d'un changement technique ou matériel vient d'être mis à la disposition des professionnels. **TÉMOIGNAGE** Un médecin cheffe de pôle en cancérologie au CHU de Tours. **DÉCRYPTAGE** Quels apports du guide lors d'un changement de matériel ? **AVIS D'EXPERT** Les facteurs organisationnels et humains au premier plan.



Isabelle Barillot

Professeure, cheffe du pôle cancérologie au CHU de Tours (Indre-et-Loire).

TÉMOIGNAGE "Le guide est proche des préoccupations des équipes"

« J'ai participé à l'élaboration du guide depuis 2016, en tant que présidente de la Société française de radiothérapie oncologique (SFRO). En 2019, l'équipe de radiothérapie du CHU de Tours (Indre-et-Loire) a éprouvé sa pertinence alors qu'elle changeait un de ses accélérateurs de particules.

Anticiper les risques

Ce projet complexe a soulevé beaucoup de questions. Le guide nous a aidés à les préciser et à les ordonner, faisant émerger des risques techniques liés au changement. Par exemple, nous disposions jusque-là de logiciels de dosimétrie différents pour chaque machine. À cette occasion, nous avons opté pour un logiciel unique. Le guide a aidé à identifier les risques relatifs aux facteurs humains et organisationnels (*lire p. 19*).

Apparaît ainsi la nécessité d'accompagner la montée en charge de travail des physiciens médicaux. Installer et s'approprier un tel équipement peut exiger quatre mois, or il faut assurer la continuité des soins. Nous avons prévu l'embauche anticipée d'un physicien.

Un autre risque, qui aurait peut-être été ignoré sans le guide, est lié à la composition de l'équipe des manipulateurs. L'année précédant le changement, nous avions remplacé six personnes ! Cela nous a incités à repenser l'organisation du compagnonnage des nouveaux arrivants. Il faut permettre aux recrues de continuer à être accompagnées pour la prise en main des appareils existants, tout en confiant le démarrage du nouvel équipement au personnel expérimenté. Le guide est concret et utile à chaque étape. Sa prise en main aisée. Son souci des réalités du terrain est apprécié. ■

Radiothérapie : sécuriser le changement d'équipement

Le guide pour l'appropriation d'accompagne les équipes dans à la technique, à l'organisation, optimale des traitements. Com



Un centre de lutte contre le cancer (CLCC) doit changer un accélérateur de particules, jugé trop ancien et dépassé, dans un service de radiothérapie

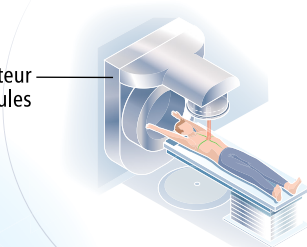
1 Le centre constitue un groupe projet (GP) et choisi un équipement adapté

Médecins, physiciens, manipulateurs, qualitiens, ingénieurs biomédicaux, informaticiens... ses membres sont issus des différents métiers impliqués. **Le GP utilise le guide** pour faciliter la mise en œuvre du nouvel accélérateur tout en maintenant la sécurité des soins.

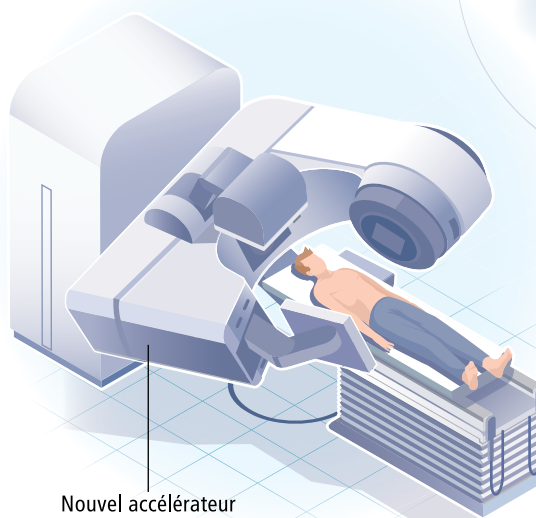


Le centre met rapidement en route les techniques classiques et bénéficie de plus de souplesse pour démarrer les nouvelles. Dans un contexte d'effectif sous tension, ceci est capital pour organiser des formations.

Ancien accélérateur de particules



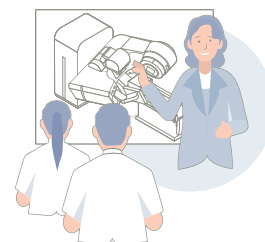
Cette machine polyvalente conserve la possibilité de traiter quatre à cinq patients par heure avec des techniques classiques, et dispose d'options avancées pour des traitements de hautes précisions indisponibles jusqu'alors.



Nouvel accélérateur de particules

2 Le changement se prépare

Pour anticiper les difficultés d'utilisation clinique de la machine, le GP évalue les besoins pour sa mise en œuvre et identifie les effets du changement sur les pratiques et sur l'organisation. Les traitements de hautes précisions nécessitent une présence médicale. Pour assurer la disponibilité d'un médecin compétent, le GP en prévoit un supplémentaire, instaure un planning d'astreinte et met en place des formations d'un nombre suffisant de praticiens.



<p>Association française de la qualité et la sécurité des soins en radiothérapie</p>	<p>Société Française de Radiothérapie Oncologique</p>
<p>afppe ASSOCIATION FRANÇAISE DU PERSONNEL PARAMÉDICAL D'ÉLECTRORADIOLOGIE</p>	<p>Société française de physique médicale</p> <p>Quatre association et sociétés ont contribué à l'élaboration du guide.</p>

LE TEMPS EST CRITIQUE

Un changement de matériel ou de technique de radiothérapie ne doit pas dégrader la sécurité des traitements. **Le guide préconise d'adapter le planning des référents de la nouveauté** pour qu'ils disposent d'un temps suffisant pour accompagner leurs pairs. **Idem pour le calendrier de prise en charge des patients**, afin que les manipulateurs s'approprient la nouveauté. Avec un planning allégé, ils n'hésitent pas à solliciter les référents au moindre doute.

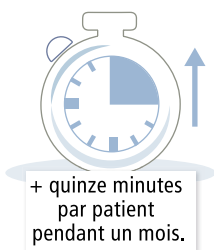
UNE APPROCHE ACCESSIBLE

Le guide est accessible à **tous les professionnels** concernés, dans **tout type de centre** – privé comme public – et pour **tout projet** de changement technique ou matériel. Il est structuré en **plusieurs niveaux de lecture**. Les titres et sous-titres **synthétisent la démarche** à suivre. Des questions guident l'utilisateur. Il propose des éclairages pédagogiques sur les facteurs organisationnels et humains.

un changement technique ou matériel en radiothérapie la mise en œuvre de la nouveauté. Questions liées aux compétences... tout vise à favoriser une sécurité ment l'utilise un centre de lutte contre le cancer ?

3 Le GP organise le déploiement clinique

Pour une appropriation sereine, la durée de la prise en charge des premiers patients est augmentée de dix à quinze minutes. Afin de faire émerger les potentielles difficultés d'utilisation – paramétrage, positionnement du patient... –, le GP programme des réunions pluridisciplinaires. Les échanges sont utiles pour partager l'expérience et éviter le retour à d'anciens réflexes, inadaptés avec le nouvel équipement.







4 Un bilan est réalisé

Après six mois à un an d'utilisation, le GP met à jour la documentation applicable – procédures, modes opératoires – utilisée par les professionnels de santé pour inclure les bonnes pratiques une fois stabilisées. Il établit le bilan du processus de changement : points critiques, erreurs... Tout est noté pour favoriser la sécurisation des futurs renouvellements.



La prise en compte du guide :

-  **Fluidifie l'organisation.** L'anticipation des adaptations organisationnelles est améliorée grâce aux échanges. Ils aident à cerner les besoins et les contraintes des divers métiers.
-  **Implique le personnel,** qui s'adapte mieux aux changements.
-  **Favorise la remontée des difficultés.** Les équipes s'autorisent à échanger plus librement sur leurs difficultés ou interrogations. Elles discutent par exemple du bien fondé du suivi des écarts quotidiens du positionnement du patient. Ceci améliore la compréhension de l'attendu de ce contrôle.
-  **Contribue à la sécurité des traitements.**

© Art-Press/ABC Communication/Médiathèque IRSN/Magazine Repères

UN CAS CONCRET D'ÉTUDE DU CHANGEMENT TECHNIQUE

Ergonomes à l'IRSN, Céline Poret et Sylvie Thellier mènent une recherche dans un centre de radiothérapie pour explorer les effets du changement d'un système d'imagerie et les risques associés pour les patients. Elles montrent que ce changement est à l'origine de déstabilisations des pratiques individuelles et collectives, pouvant affecter l'appropriation du nouveau système. Ces résultats seront diffusés auprès des professionnels de santé courant 2022.

POUR EN SAVOIR PLUS

Le guide répond à une demande de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Son analyse du retour d'expérience des événements significatifs de radioprotection montre que des changements techniques ou matériels en radiothérapie externe fragilisent parfois les précautions sécurisant les traitements. www.irsn.fr/guide-materiel-radiotherapie

CONTACT

Magali Edouard : magali.edouard@irsn.fr
Valérie Vassent : valerie.vassent@irsn.fr

AVIS D'EXPERT



Magali Edouard et Valérie Vassent

Expertes en facteurs organisationnels et humains et en physique médicale respectivement (de gauche à droite)

“Le guide s'appuie sur des bonnes pratiques”

“ Environ 80 % des accidents d'exposition sont liés aux facteurs organisationnels et humains (FOH). Le guide d'accompagnement au changement matériel et technique s'appuie sur l'expertise FOH et sur celle de la maîtrise des risques en physique médicale. Ses recommandations sont issues de l'expérience des professionnels de la radiothérapie qui ont déjà déployé des nouveautés techniques ou matérielles dans leurs services. Le guide préconise une vision pluridisciplinaire pour favoriser la compréhension des contraintes des professionnels. Par exemple, si les dosimétristes comprennent les besoins des manipulateurs en vue du traitement, ils adapteront mieux les données transmises au cours de sa préparation, telle l'image de référence pour le positionnement du patient. Il recommande des échanges réguliers entre ces métiers et conseille que les utilisateurs de la nouveauté soient impliqués dès le début d'un projet. Il est nécessaire de préserver la capacité des équipes à s'adapter à la nouvelle situation, par exemple en accordant davantage de temps aux premiers traitements avec le nouvel appareil.

CONTACTS

Magali Edouard
magali.edouard@irsn.fr
Valérie Vassent
valerie.vassent@irsn.fr

Quand la microscopie électronique stimule les échanges

Cinquante scientifiques de tous horizons ont pris part à la deuxième Journée des plateformes scientifiques de l'IRSN (JPSI), dédiée à la microscopie électronique. L'occasion de partager leur expertise, d'élargir leurs connaissances et de nouer des collaborations.

1 Pourquoi participer à la JPSI ?

Chimiste au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) à Cadarache (Bouches-du-Rhône), Damien Faivre assiste à la deuxième édition de la Journée des plateformes scientifiques de l'IRSN (JPSI).

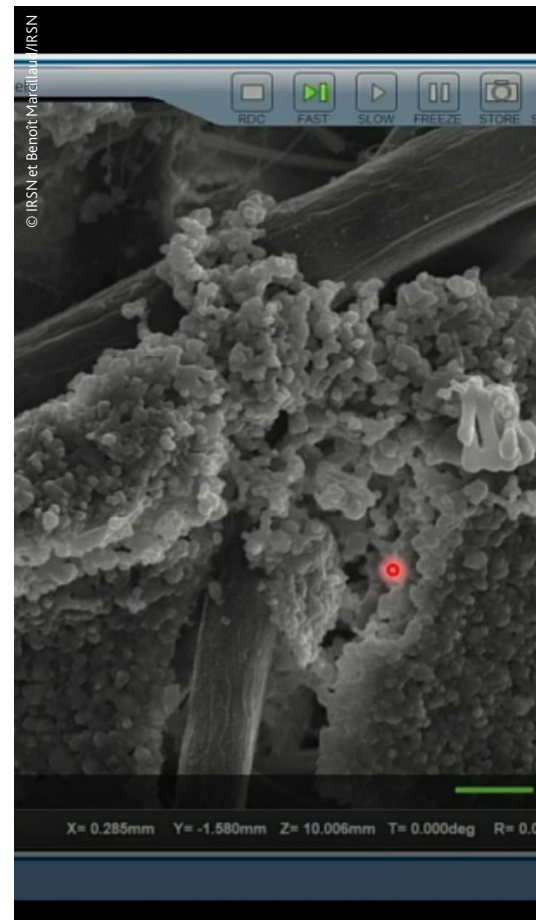
« Il est intéressant de voir toutes les possibilités analytiques en microscopie électronique présentes à l'IRSN, raconte le chercheur. J'utilise déjà de nombreuses techniques, mais les applications plus spécifiques de l'Institut me sont moins familières, par exemple l'étude de cellules eucaryotes grâce à la préparation de couche mince ». Comme les thématiques de recherche et les objets étudiés sont différents, il y a toujours matière à apprendre. « Chacun a son domaine de spécialisation et il est intéressant de voir

ce que font d'autres équipes, pour créer des interactions », considère-t-il.

Le format de l'événement est aussi motivant. La JPSI s'adresse à un public expert aussi bien qu'aux non-spécialistes de la thématique. « Lors des présentations de la matinée, les bases scientifiques de chaque technique d'imagerie sont rappelées, ce qui est utile », remarque Nathalie Valle, responsable de la plateforme de caractérisation avancée des matériaux au List (Luxembourg Institute of science and technology) et spécialiste des sondes ioniques. Cette seconde édition privilégie les discussions. Elle se termine par un atelier participatif. « Le format 2021 est plus interactif, cela favorise les échanges. »



Damien Faivre, dans son laboratoire au CEA, avec un des microscopes qu'il utilise pour ses recherches.



© IRSN et Benoit Marcliau / IRSN



Magali Floriani, ingénieure de recherche à l'IRSN, introduit le support d'échantillon dans un microscope électronique à transmission (MET).

2 Quelles sont les problématiques ?

Damien Faivre travaille sur des bactéries pouvant se déplacer le long d'un champ magnétique. Il collabore, depuis 2018, avec Magali Floriani, ingénieure de recherche au Laboratoire d'écotoxicologie des radionucléides (Leco) à Cadarache. Lors de cette journée, elle partage ses connaissances sur le couplage de la microscopie électronique en transmission (MET) et de la spectroscopie des rayons X par dispersion en énergie (EDX)¹. Un savoir-faire inspirant pour Damien Faivre. « Il est intéressant de découvrir de nouveaux objets et comment ils sont traités à l'IRSN », remarque-t-il. Magali Floriani étudie non pas des bactéries, mais des eucaryotes, plus gros et plus structurés. Pour que le faisceau d'électrons du microscope puisse les traverser, il faut réaliser des coupes fines. « Mon équipe a récemment découvert que des organismes unicellulaires – amibe, paramécie... – font des symbioses avec nos bactéries », relate le chercheur. L'expertise du Leco l'aide à préparer ces échantillons.

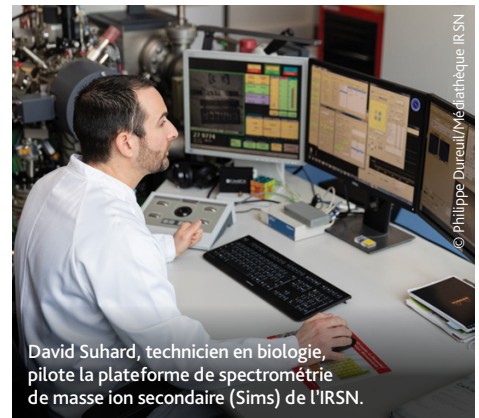
1. Présentation à la JPSI : Au cœur de vos tissus biologiques avec le MET/EDX.

3 Est-ce un catalyseur de collaborations ?

L'événement est l'occasion de renforcer des collaborations. Il y a deux ans, l'IRSN décide de s'équiper d'une sonde ionique ou spectromètre de masse d'ions secondaires (Sims)². Il contacte Nathalie Valle. « J'interviens en tant qu'experte pour les aider à monter le projet », raconte-t-elle. Lorsqu'en 2020, la JPSI se consacre aux sondes ioniques, l'Institut invite tout naturellement la scientifique à partager son savoir-faire.

« Ces journées sont intéressantes, car même si nous n'analysons pas les mêmes échantillons, nous utilisons les mêmes techniques. » Elles favorisent la mise en réseau. « Si un jour j'ai besoin d'une technique spécifique, je connais maintenant les scientifiques qui peuvent m'aider », remarque Damien Faivre.

2. La Sims pulvérise l'échantillon étudié avec un faisceau d'ions, puis récupère les atomes arrachés pour l'analyse.



David Suhard, technicien en biologie, pilote la plateforme de spectrométrie de masse ion secondaire (Sims) de l'IRSN.

4 Le partage d'expérience est-il possible ?

Invité en 2020³, Jérôme Aléon est chercheur à l'Institut de minéralogie, physique des matériaux et cosmochimie (IMPMC). Spécialiste de la Sims, il est responsable de la plateforme Nanosims hébergée par le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN). En 2016, débute une collaboration entre l'IMPMC et l'IRSN, dans le cadre d'une thèse⁴ co-encadrée à l'Institut par Alkis Gourgiotis, spécialiste de géochimie isotopique. « Nous avons réalisé des images isotopiques de l'uranium et des produits de sa décroissance. Le but était de comprendre sa mobilité en aval de site minier : est-il précipité, dissous, immobile ? décrit le chercheur. La Nanosims donne accès à l'échelle de 1 micron. » Lors de la JPSI, il partage les possibilités de l'instrument et de collaboration.

3. Présentation à la JPSI : Sondes ioniques : de la science des matériaux à la biologie.
4. Spéciation et mobilité de l'uranium dans des sols et des sédiments lacustres en aval d'anciens sites miniers www.irsn.fr/mobilite-uranium



Lors des JPSI, Benoit Marcillaud, technicien d'analyse à l'IRSN, aborde la microscopie électronique à balayage (MEB). Ici, la photographie d'un filtre colmaté par des aérosols de sel.



5 De nouveaux projets émergent-ils ?

Accessible aux chercheurs spécialistes ou non des techniques d'imagerie présentées, la JPSI est avant tout une opportunité pour échanger entre pairs.

« C'est une ouverture scientifique sur une thématique qui n'est pas la sienne et un rendez-vous méthodologique », observe Jérôme Aléon.

En 2019, dans le cadre du partenariat avec l'IRSN, la plateforme Nanosims se dote d'une source d'ions optimisée pour analyser des éléments lourds.

« Je travaille habituellement sur des éléments légers, comme l'hydrogène. Grâce à la collaboration avec l'IRSN, j'ai développé des compétences sur des éléments lourds, comme l'uranium. Cela donne des perspectives nouvelles à mes futurs travaux sur les météorites. » Un deuxième projet est lancé. « Nous regardons maintenant la mobilité de l'uranium, dans des résidus miniers », décrit Jérôme Aléon. Alors que le premier projet se termine, un troisième est en discussion...



Au Muséum national d'histoire naturelle, Jérôme Aléon étudie l'uranium 238.

Cocagne

Crayons de combustible sous pression

La pression atteint 100 bars et la température 1 000 °C. Les conditions sont extrêmes pour les crayons de combustible étudiés par les essais Cocagne, à Cadarache dans les Bouches-du-Rhône. But de ces expérimentations ? Mieux cerner leur comportement en cas d'accident.

Éclairée par un néon, Pauline Lacote s'affaire autour d'une structure métallique de deux mètres de haut, truffée d'appareils qui mesurent les déformations de crayons de combustible. La technicienne du Laboratoire d'expérimentation en mécanique et matériaux (LE2M) achève d'installer le dispositif des essais Cocagne¹, à Cadarache, dans les Bouches-du-Rhône. Sa finalité ? Reproduire les contraintes qui s'exerceraient sur la gaine en alliage de zirconium du crayon de combustible – première barrière de confinement – après une défaillance du système de refroidissement d'un réacteur à eau sous pression.

« Les tests de résistance sont faits sur des tronçons de crayons de 60 cm de long. Leur pression interne peut être portée jusqu'à 100 bars et la température atteindre 1 000 °C », précise Cristina Dominguez, chercheuse en matériaux au LE2M.

Des essais gonflés à bloc

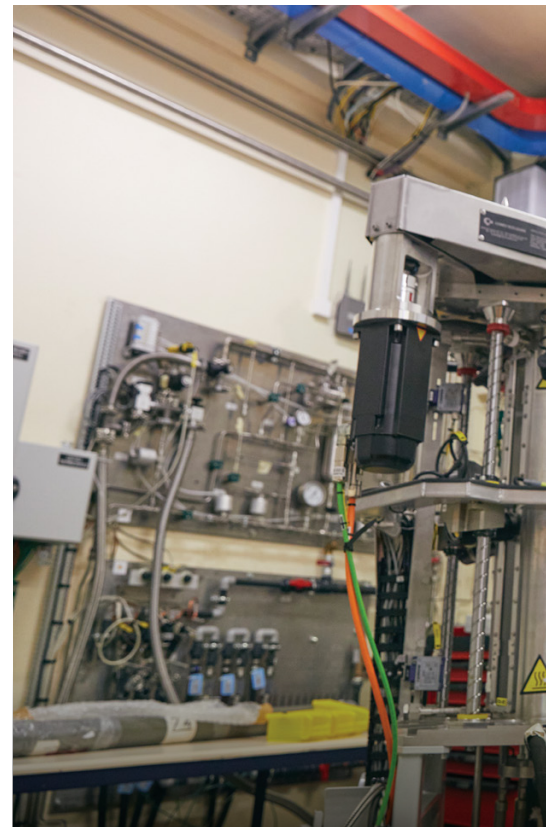
Ces essais thermodynamiques débutent en 2017. Ils étudient la déformation des gaines dans diverses conditions de pression et de température, représentatives d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP)². Une quinzaine de personnes contribue à leur mise en place. La modélisation des essais en mobilise six en plus. Les mises à l'épreuve de Cocagne visent à constituer une base de données nécessaires

pour valider et développer des codes de calcul du logiciel de modélisation Draccar³ de l'IRSN. Les experts l'utilisent pour analyser les dossiers de sûreté des exploitants, car il décrit le comportement du combustible nucléaire lors d'un APRP, depuis la déformation des crayons jusqu'aux échanges thermiques pendant le renoyage du cœur⁴.

Une obstruction limitée

Après un tel accident, les gaines gonflent, car la pression au sein des crayons reste élevée tandis qu'elle chute à l'extérieur. La forme en ballon qui en résulte obstrue localement les interstices au sein des assemblages et compromet l'efficacité du renoyage. Cocagne simule les contacts avec les crayons voisins déformés. Une première. « Cela aide à mieux évaluer l'impact de ces contacts sur la longueur, la forme finale du ballon et le taux de bouchage induit », explique la chercheuse. L'analyse des premiers essais montre que le taux de bouchage n'excède pas en moyenne 90 %, la valeur maximale fixée par les études de sûreté. « La forme en ballon de la gaine entrave l'écoulement de l'eau, mais cette gêne est moins importante que celle que nous attendions », complète Cristina Dominguez.

« Les données générées par Cocagne confirment les choix de géométrie des crayons utilisés dans un autre volet du projet, qui examine la capacité de refroidissement d'un assemblage au cours du renoyage⁵ », souligne



Georges Repetto, spécialiste en thermohydraulique, au Service de l'ingénierie et des projets de recherche, à Cadarache. Les conclusions renforceront Draccar, le rendant apte à étudier un éventail encore plus large de séquences accidentelles. ■

1. L'essai Cocagne (mené sur la plateforme Maestro) étudie la réponse des matériaux aux environnements agressifs – température, oxydation, etc. – en situations normale et accidentelle. Il relève du programme Perfroi (Étude de la perte de refroidissement) piloté par l'IRSN. www.irsn.fr/perfroi
2. Accident résultant d'une brèche au niveau du circuit primaire du réacteur.
3. Logiciel Draccar www.irsn.fr/draccar
4. Le renoyage fait suite au démarrage du système d'injection de sécurité qui permet d'injecter de l'eau dans la cuve et de refroidir le cœur.
5. Tests menés par la société canadienne Stern Laboratories pour le compte de l'IRSN.



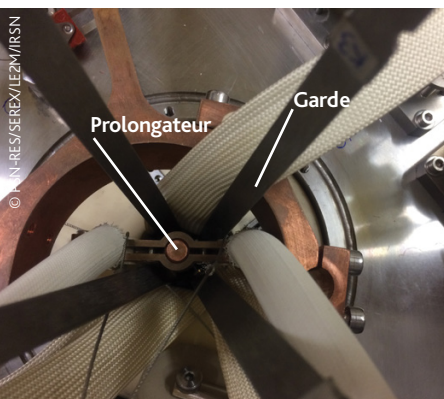
WEBMAGAZINE



DIAPORAMA

Elfe : mieux dimensionner les températures des essais

www.irsn.fr/R53



Expérimentation multi-crayons

Vue du dessus de l'installation en phase de montage des connexions électriques. Quatre gardes (en noir) entourent un tronçon de gaine combustible. Celui-ci sera fixé sur le prolongateur en cuivre qui chauffe le crayon, en lui amenant le courant électrique. Ces dispositifs simulent la présence d'autres crayons au voisinage de l'échantillon. Ils sont remplacés à l'issue de chaque campagne d'analyse.

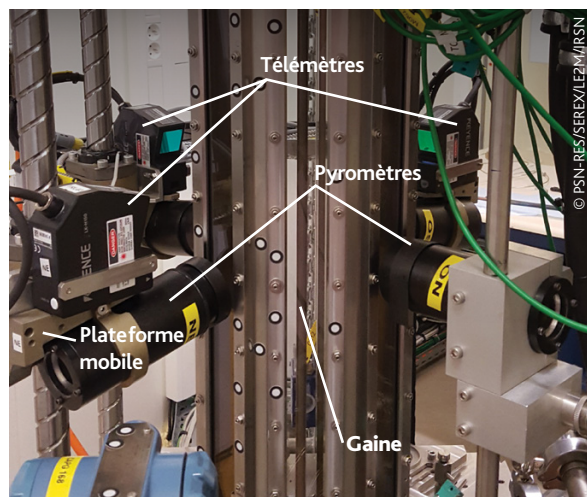


Déterminer les propriétés mécaniques de la gaine

L'essai Elfe vise à établir les lois de déformation de la gaine à de très fortes températures. Ses résultats servent aussi au logiciel Draccar. Il s'agit de valider les modèles de déformation utilisés. Au préalable, chaque échantillon de gaine en alliage de zirconium est oxydé, reproduisant l'altération de l'enveloppe du crayon telle qu'elle se produit dans un réacteur à eau sous pression.

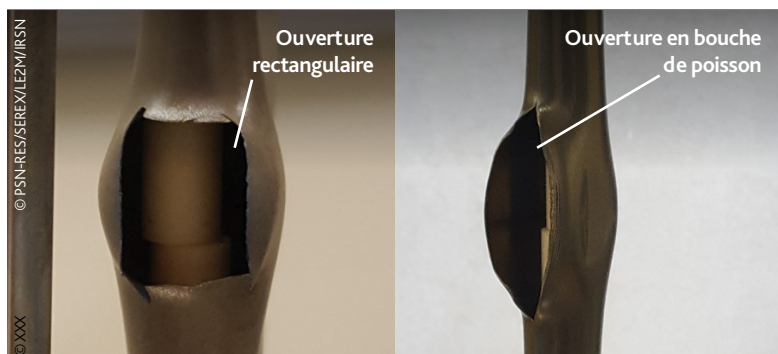


Cristina Dominguez (à droite), chercheuse en matériaux, et Pauline Lacote (à gauche), technicienne au Laboratoire d'expérimentation en mécanique et matériaux (LE2M), autour de l'installation Cocagne.



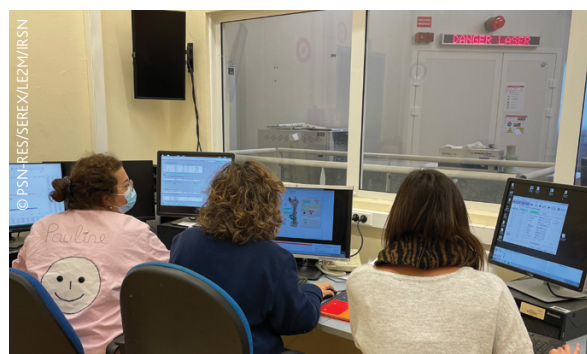
Une installation bardée de capteurs

Plusieurs instruments de mesure font la force de Cocagne. Des pyromètres ultraviolets mesurent la température à la surface du crayon. Trois téléètres laser enregistrent les déformations de la gaine. Installés sur une plateforme mobile, ils se déplacent verticalement sur toute la hauteur de l'échantillon lors d'un essai.



La forme de l'ouverture dépend du niveau de pression

À l'issue d'un essai, la longueur des ballons ne dépasse jamais 10 cm. L'ouverture allongée – en bouche de poisson – se forme pour des pressions comprises entre 20 et 50 bars. Elle est rectangulaire à partir de 100 bars. Ces ouvertures résultent de la rupture de la gaine, consécutive à la très forte pression régnant à l'intérieur de celle-ci.



Un suivi en temps réel

Une fois la salle de confinement abritant Cocagne fermée, l'expérience commence. La montée en température de la gaine – de 5 à 10 °C par seconde selon les essais – et sa déformation sont suivies depuis la salle de commande en temps réel. La phase finale – l'éclatement des gaines – peut être très rapide. Trois personnes sont parfois nécessaires pour suivre toutes les mesures.

Le suivi dosimétrique facilité

Conseillers en radioprotection, vous recherchez un service fiable pour assurer le suivi des professionnels exposés ? Que vous travailliez dans le domaine médical, nucléaire, industriel ou dans la recherche, l'IRSN vous propose une gamme complète de dosimètres passifs performants et ergonomiques. Un portail de gestion et de commande vous facilite la dosimétrie.



Contactez-nous

dosimetre@irsn.fr
Toutes les informations sur
<http://dosimetrie.irsn.fr>

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE