

# REPERES

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

EN PRATIQUE

Uranium : un traitement d'urgence  
pour décontaminer la peau

DOSSIER

Radiologie interventionnelle

## La radioprotection s'améliore



REPORTAGE

Transport des combustibles :  
un chargement sous haute  
radioprotection





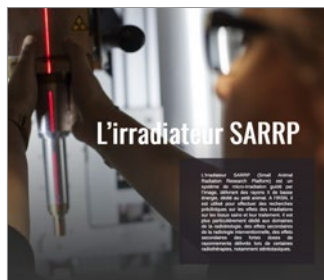
## Un document de référence sur les réacteurs de fusion

Étayé par l'analyse de la sûreté d'ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), ce nouvel ouvrage est un référentiel pour les projets de développement des réacteurs nucléaires de fusion. Ils présentent des problématiques spécifiques comme le risque d'explosion d'isotopes de l'hydrogène, le dysfonctionnement de plasma...

[www.irsn.fr/reacteurs-fusion](http://www.irsn.fr/reacteurs-fusion)

## Découvrez les installations expérimentales de l'IRSN

La série « Grand format » sur [irsn.fr](http://irsn.fr), dans la rubrique La Recherche, vous présente, en associant textes et images, les installations de recherche de l'Institut. Le dernier reportage publié est consacré au SARRP



(Small Animal Radiation Research Platform), un système de micro-irradiation guidé par l'image, délivrant des rayons X de basse énergie. Cet irradiateur est utilisé sur les petits animaux pour des travaux sur les effets secondaires de la radiologie interventionnelle, la radiothérapie, etc.

[www.irsn.fr/sarrp](http://www.irsn.fr/sarrp)

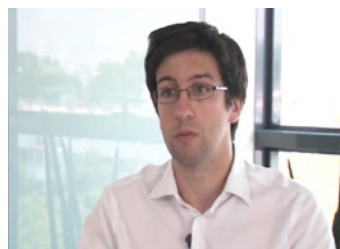


## Une étude sur le risque incendie

Pour son habilitation à diriger des recherches (HDR), Hugues Prétel s'est penché sur la

dynamique des incendies en milieu confiné et mécaniquement ventilé. Objectif : développer des outils de calculs prédictifs pour la maîtrise des risques en cas d'incendie dans les installations nucléaires. Les résultats de ce travail, comme les autres mémoires de HDR, sont disponibles en ligne.

[www.irsn.fr/HDR-Pretrtel](http://www.irsn.fr/HDR-Pretrtel)



## Vidéo : Où sont stockés les déchets radioactifs en France ?

François Marsal, ingénieur, répond à cette question dans une interview disponible en vidéo sur le site de l'IRSN, dans la rubrique consacrée à la gestion et au stockage des déchets radioactifs. D'autres vidéos sont consacrées à ce thème : Qu'est-ce qu'un déchet radioactif ? Peut-on les stocker en mer ? Quelle est leur durée de vie ?

[www.irsn.fr/video-dechets](http://www.irsn.fr/video-dechets)

# Agenda

Du 6 au 14 octobre

Partout en France

## Fête de la science

Cette année encore, l'IRSN participe à la Fête de la science. Il sera présent sur 4 sites : la Cité des sciences (Paris), Cadarache (Bouches-du-Rhône), Vinon-sur-Verdon (Var) et Saint-Lô (Manche). Au programme, rencontres avec des experts, exposition sur la radioactivité et jeux pédagogiques...

Plus d'information :

<https://www.fetedelascience.fr/>

6 et 7 novembre 2018

Lyon (Rhône)

## Rencontres des personnes compétentes en radioprotection

L'IRSN tiendra un stand sur le salon pour informer les visiteurs, notamment sur la nouvelle réglementation en matière de radioprotection. Vous pourrez dialoguer avec des experts lors de tables rondes sur l'exposition au radon ou l'évolution des normes. Le laboratoire de dosimétrie de l'Institut sera également présent. Cette onzième édition est organisée par la Société française de radioprotection (SFRP).

Plus d'information :

[www.sfrp.fr](http://www.sfrp.fr)

3 et 4 décembre 2018

Montbéliard (Doubs)

## Séminaire Radon & territoires

L'objectif de ce rendez-vous est d'échanger sur les bonnes pratiques concernant la gestion du risque lié au radon et l'amélioration de la qualité de l'air intérieur. Il est organisé par les partenaires de la Démarche pluraliste radon et qualité de l'air intérieur en Bourgogne-Franche-Comté.

Plus d'information :

[www.radon-qai-fcomte.fr](http://www.radon-qai-fcomte.fr)

# On line WEBMAG

[www.irsn.fr/R39](http://www.irsn.fr/R39)



Radiologie interventionnelle  
**Physicien médical : au service de la radioprotection**



Pratiques radioguidées  
**Vers plus de sécurité**



Reportage : transport des combustibles  
**Un chargement sous haute radioprotection**

## Abonnement

**POUR VOUS ABONNER :**

[www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)

Rubrique l'IRSN > Publications  
> Magazine Repères

# Sommaire

En couverture : Service de neuroradiologie interventionnelle de l'hôpital Pasteur 2, à Nice (Var).

## P.4 TEMPS FORTS

Doctrine post-accidentelle  
**Un zonage plus fiable pour les populations impactées**

Mesure de la radioactivité  
**Quarante laboratoires participent à un essai comparatif**



## P.6 FAITS ET PERSPECTIVES

Sûreté des réacteurs  
**Les experts mobilisés sur les défauts des cuves**

## P.9 ZOOM

**L'environnement sur le grill !**

## DOSSIER P.10

**Dossier du prochain numéro :**  
Événements significatifs de radioprotection

**Radiologie interventionnelle**  
**La radioprotection s'améliore**

## P.17 EN PRATIQUE

Calixarène  
**Un traitement d'urgence pour la contamination cutanée à l'uranium**

## P.20 INTÉRÊT PUBLIC

**Le public découvre le confinement dans l'argile**

## P.22 REPORTAGE

Transport des combustibles  
**Un chargement sous haute radioprotection**

**REPÈRES** – Éditeur : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire – 31, avenue de la Division-Leclerc, 92260 Fontenay-aux-Roses – Tél. : 01 58 35 88 88 – Site Internet : [www.irs-n.fr](http://www.irs-n.fr) – Courriel : [reperes@irs-n.fr](mailto:reperes@irs-n.fr) – Directeur de la publication : Jean-Christophe Niel – Directrice de la rédaction : Marie-Pierre Bigot – Rédactrice en chef : Catherine Roulleau – Assistante de rédaction : Isabelle Cussinet – Ont collaboré à ce numéro : Stéphanie Clavelle, Aleth Delattre, Pascale Monti – Comité de lecture : François Bréchnignac, Louis-Michel Guillaume – Rédaction et réalisation : **CITIZENPRESS** – Maquette et direction artistique : Vincent Dulau – Iconographie : Sophie Léonard – Photos de couverture : © A. Noor / BSIP, Laurent Zylberman/Graphix-Images/Médiathèque IRSN – Impression : Galaxy (72) – Imprimé sur Cyclus Print – ISSN : 2103-3811 et 2491-8776 (Web) – Octobre 2018.

© Philippe Dureau/Médiathèque IRSN



## Crise Réfléchir sur le long terme

Longtemps, la gestion de crise s'est concentrée sur les premières heures qui suivent un accident : remettre l'installation en état sûr et protéger rapidement la population. L'accident de Fukushima démontre l'importance de s'entraîner à gérer une crise sur le long terme. Sept ans plus tard, le retour de la population est difficile dans les zones où la mesure d'évacuation a été levée. L'IRSN contribue à faire évoluer la doctrine post-accidentelle française. Il participe à des activités de recherche – par exemple, le projet européen Territoires sur l'exposition à long terme dans des zones contaminées – et mène une réflexion en interne et au sein du comité directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle.

**Jean-Luc Lachaume**

Directeur délégué à la crise

**IRSN**  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Conformément au Règlement (UE) Général de Protection des Données (RGPD), toutes les données personnelles collectées directement ou indirectement dans le cadre du magazine Repères sont traitées aux fins de mise à disposition du magazine. Les utilisateurs sont informés qu'ils disposent d'un droit de modification, de suppression et d'effacement des informations le concernant. Ces droits peuvent être exercés en adressant une demande écrite auprès de l'IRSN Direction de la communication, Magazine Repères, BP 92 262 Fontenay-aux-Roses.



## Réglementation

### Création des « conseillers en radioprotection »

Toute structure employant des travailleurs susceptibles d'être exposés à des rayonnements ionisants doit désormais désigner un conseiller en radioprotection afin de mettre en œuvre des mesures de prévention pour le personnel. Salarié de l'entreprise – une personne compétente en radioprotection (PCR) – ou personne morale – un organisme compétent en radioprotection –, le conseiller en radioprotection assiste le responsable d'activités nucléaires pour la radioprotection de la population et de l'environnement.

C'est l'une des évolutions inscrites dans deux décrets publiés le 4 juin 2018, auxquels l'IRSN a apporté sa contribution. Le conseiller déclinera dans les entreprises d'autres changements réglementaires : l'organisation des contrôles techniques, la mise en œuvre de nouvelles règles pour le zonage radiologique, la prise en compte du risque radon dans un domaine plus large, l'abaissement de la valeur limite d'exposition pour le cristallin de 150 mSv/an à 20 mSv/an, etc.

 Plus d'informations dans le prochain numéro de Repères.

## RADIOLOGIE INTERVENTIONNELLE

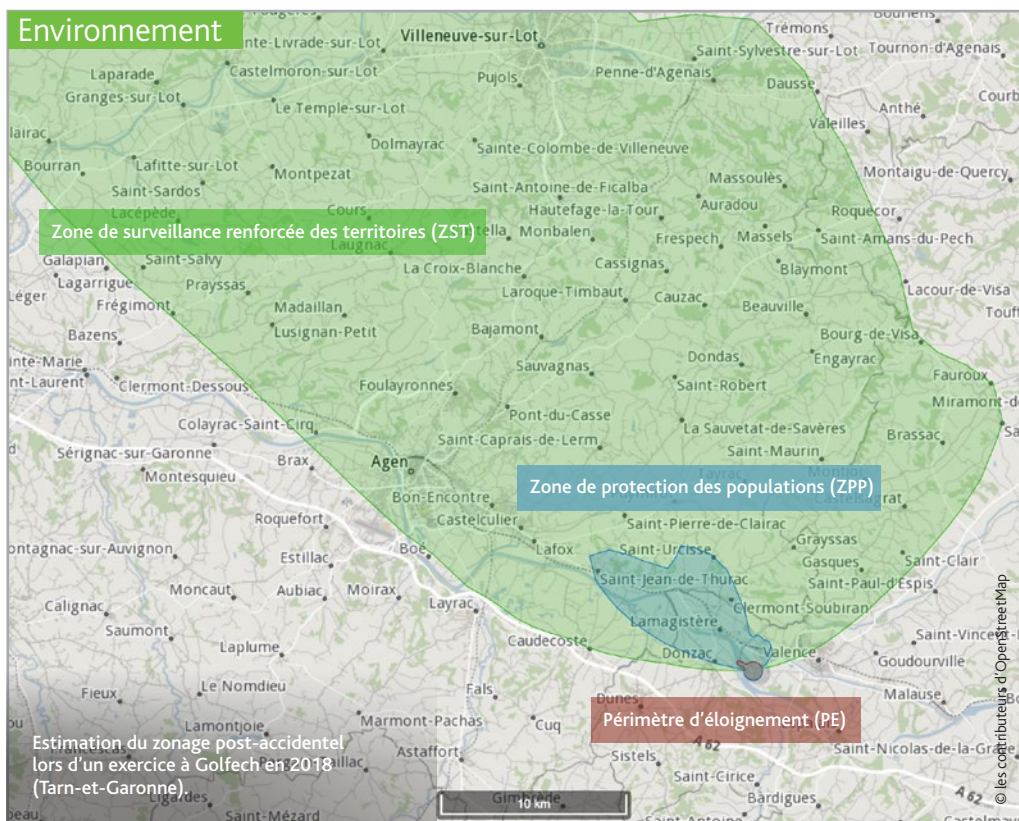
# 3 Gy

C'est l'un des seuils d'alerte, fixés par la Haute Autorité de santé, qui doit enclencher un suivi du patient après une procédure de radiologie interventionnelle.

# 1 700

professionnels de radiologie interventionnelle ont bénéficié d'une surveillance de la dose au cristallin en 2017. (Source : Fédération de radiologie interventionnelle)

Retrouvez notre dossier en page 10.



## Doctrine post-accidentelle

### Un zonage plus fiable pour les populations impactées

« Le zonage est l'élément structurant du dispositif de protection des populations et de l'environnement en cas d'accident nucléaire conduisant à des rejets radioactifs importants », indique Damien Didier, ingénieur en modélisation des transferts dans l'environnement. C'est donc sur lui que les experts de l'IRSN se sont focalisés pour mettre à jour la doctrine post-accidentelle. Le texte prend en compte des enseignements tirés de l'accident de Fukushima. « Nous avons émis deux principales recommandations : construire le premier zonage en exploitant un nombre suffisant de mesures de la radioactivité dans l'environnement pour qu'il soit fiable et, sur cette base, prédire son évolution dans le temps. » Objectif : informer la population, les décideurs et les producteurs agricoles, afin qu'ils mettent en place les stratégies les plus adaptées à la situation et à son évolution.

Dans la doctrine actuelle, le zonage consiste à délimiter un périmètre d'éloignement (PE) - au sein duquel la contamination de l'environnement est trop importante pour y vivre -, une zone de protection des po-

pulations (ZPP) - où la consommation de denrées locales est interdite - et une zone de surveillance renforcée des territoires (ZST) - dans laquelle les denrées sont susceptibles de dépasser les seuils maximaux autorisés par le règlement Euratom.

Selon Jean-Pierre Charre, pilote du groupe de travail Codirpa<sup>1</sup> de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), « il est indispensable d'informer rapidement les populations impactées, et éventuellement éloignées, sur leurs nouvelles conditions de vie et les possibilités de retour sur leur territoire. Des zonages précis et cohérents sont nécessaires. »

Ces derniers doivent comporter des délais réalistes, des informations sur l'alimentation, la vie sociale et la radioprotection, afin d'aider les populations et d'orienter les autorités dans la gestion de la crise. Les recommandations de l'IRSN sont actuellement étudiées par le Codirpa. La nouvelle doctrine devrait voir le jour d'ici un ou deux ans.

1. Comité directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle.

Santé



Des expertes mesurent la dose absorbée dans les minifaisceaux.

© Laurent Zylberman/Graphic-Images/Médiathèque IRSN

Radiothérapie stéréotaxique

Un protocole pour vérifier l'étalonnage des appareils

« **Q**uand un patient suit une radiothérapie stéréotaxique, il faut être sûr que l'accélérateur linéaire délivre la bonne dose de rayons », note Patrice Jalade, physicien médical aux Hospices civils de Lyon. La radiothérapie stéréotaxique consiste à faire converger des faisceaux de photons de petite dimension sur une cible – une tumeur, une métastase – afin de la détruire. Une technique efficace mais pas sans danger.

En 2007, à Toulouse, 145 patients ont reçu une surdose de rayons liée à une mauvaise calibration de l'intensité du faisceau. Pour améliorer la radioprotection, l'IRSN a mis au point un protocole de caractérisation des minifaisceaux.

Avant l'utilisation d'un nouvel appareil, les caractéristiques dosimétriques des faisceaux sont mesurées à l'aide de détecteurs spécifiques.

« Nos outils ne nous fournissent qu'une indication relative, qu'il faut préciser, note le professionnel. Lors du remplacement de notre équipement, nous avons souhaité confronter nos mesures avec celles du laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants de l'Institut, qui a développé ce protocole. Nous avons obtenu une validation de nos résultats. »

**www** Pour en savoir plus :  
Laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants de l'IRSN  
[www.irsn.fr/LDRI](http://www.irsn.fr/LDRI)

« Il faut être certain que la dose de rayons demandée à la machine est bien la dose délivrée. »

Environnement



Les dispositifs durant l'essai de comparaison interlaboratoires, en juin 2018.

© Céline G. / Mediathèque IRSN

Mesure de la radioactivité

Quarante laboratoires participent à un essai comparatif

La marine nationale a participé à un essai de comparaison inter-laboratoires (EIL) portant sur la mesure de l'équivalent de dose gamma dans l'air ambiant « Pour l'occasion, nous devons nous déplacer avec notre matériel de mesure, qui n'est pas mobile. Nous avons donc développé un nouveau dispositif, raconte Frantz Pieuchot, responsable de la cellule pilote du système de surveillance nucléaire de la marine. L'exercice a été enrichissant. Nous avons comparé nos méthodes de travail avec celles des autres participants. » Organisé en juin par l'IRSN

sur le site du Vésinet (Yvelines), cet essai a réuni quarante laboratoires de surveillance de l'environnement. Pour la première fois, ils sont venus tester, au même moment et dans les mêmes conditions, leurs dispositifs. L'EIL est une des étapes nécessaires au renouvellement de leur agrément par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). La marine nationale assure le suivi radiologique autour de ses bases navales et doit démontrer la conformité de ses mesures.

**www** Pour en savoir plus :  
<https://cilei.irsn.fr/>

Cycle du combustible  
Mix énergétique :  
deux scénarios  
sont étudiés

L'IRSN a rendu son avis sur le dossier d'EDF concernant le cycle du combustible. « Les installations et les transports ont les capacités pour assurer le fonctionnement du cycle jusqu'en 2025 », indique Florence Gauthier, experte en sûreté.

La loi prévoit une diminution de la production de l'électricité nucléaire d'ici 2025. C'est pourquoi l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé aux exploitants d'analyser deux scénarios : l'arrêt de réacteurs de 900 mégawatts chargés en combustibles MOX<sup>1</sup> ou l'arrêt de réacteurs de 1 300 mégawatts à base d'oxyde d'uranium naturel enrichi.

« Il faut examiner l'impact du type de réacteur sur le scénario de mix énergétique retenu », précise l'experte. Ce dossier est élaboré tous les dix ans par EDF – avec le groupe Orano et l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).

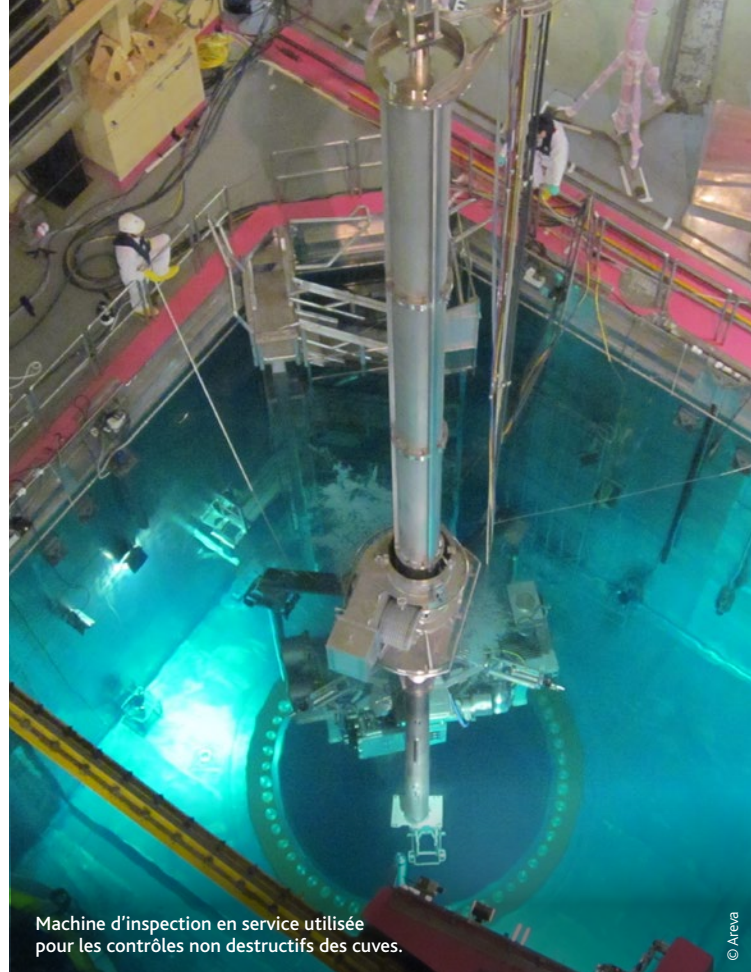
<sup>1</sup>. Combustibles à base d'oxydes mixtes d'uranium et de plutonium





Isabelle Delvallée (à gauche) et Lili Ducouso-Ganjehi sont expertes en sûreté des cuves de réacteur.

© Céline Lalache/Médiathèque IRSN



Machine d'inspection en service utilisée pour les contrôles non destructifs des cuves.

© Areca

### Sûreté des réacteurs

# Les experts mobilisés sur les défauts des cuves

Les cuves en acier contenant les cœurs des réacteurs font l'objet d'une surveillance périodique en exploitation. Lorsque des défauts sont détectés, une évaluation de leur nocivité est menée. Dans certains cas complexes, des groupes internationaux d'experts peuvent être mandatés. Cela a été le cas récemment en Belgique et en Suisse.

**R**éacteur Doel 3, en Belgique. Un contrôle par ultrasons fait état d'anomalies dans l'acier de la paroi de la cuve du réacteur.

Tihange 2, toujours en Belgique, présente le même type de défaut. Les deux réacteurs sont mis à l'arrêt. Dans son édition du 9 août 2012, le quotidien *Le Monde* titre : « Soupçons sur les cuves de 22 réacteurs nucléaires », laissant entendre que ces anomalies pourraient concerner, dans 8 pays, l'ensemble des cuves provenant du même fabricant néerlandais. Pour examiner ces défauts, l'Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN), en Belgique, mandate plusieurs spécialistes internationaux, dont ceux de l'IRSN. Les experts de l'Institut sont régulièrement sollicités pour analyser les différentes anomalies

sur les cuves de réacteur. Ces expériences à l'étranger servent aussi pour leurs expertises des cuves françaises.

### Des défauts sans risques pour la sûreté

« Les anomalies détectées en Belgique sont des défauts dus à l'hydrogène [DDH] », indique Bernard Monnot, ingénieur spécialiste en technologie de fabrication à l'IRSN, qui a fait partie d'un groupe d'experts internationaux sur ce sujet. « Il s'agit d'une maladie connue. Lors de la fabrication de pièces en acier, si la concentration d'hydrogène est trop importante, des fissures peuvent se former et aboutir à de fines décohésions de 15 à 20 mm de diamètre. Dès les années 1960, les industriels ont optimisé les procédés de fabrication pour diminuer la teneur

en hydrogène grâce à des moyens d'élaboration et de coulée sous vide des lingots », précise l'expert. En France, depuis 1980, les éventuels DDH sont détectés en amont grâce aux contrôles effectués en cours de fabrication par les forgerons. « Certaines de ces pièces rebutées en France ont été utilisées par l'exploitant belge pour analyser le comportement du matériau en présence de DDH », se souvient Bernard Monnot. Dans le cas des cuves belges, les études ont conclu que la présence des défauts dus à l'hydrogène ne remettait pas en cause la sûreté des réacteurs.

En France, après la découverte de ces anomalies en Belgique, EDF décide de réexaminer l'ensemble des contrôles par ultrasons réalisés sur les cuves et de refaire une lecture fine des enregistrements. Les don-



nées de fabrication sont revues par l'industriel, et les viroles<sup>1</sup> de cuves de certains réacteurs font l'objet de contrôles spécifiques et de nouveaux examens. « *Aucune des 58 cuves en exploitation en France ne présente de DDH* », affirme Nicolas Jardin, expert en cuves chez EDF. « *Cet épisode a mis en évidence le bon état des équipements et la qualité de notre référentiel de contrôle, de fabrication et d'exploitation* », se réjouit-il.

D'autres anomalies ont été observées par le passé. Des défauts sous revêtement (DSR) affectent sept cuves du parc français (voir infographie). Ce problème est lié au soudage du revêtement inoxydable sur l'acier ferritique. « *Il concerne les installations les plus anciennes car, depuis le début des années 1980, le protocole de soudage a changé pour éviter l'apparition de ces défauts* », précise Bernard Monnot. L'Institut expertise les résultats des contrôles périodiques : « *Nous utilisons les données relevées lors du contrôle décennal pour suivre les anomalies sur presque quarante ans. Nous n'observons pas d'évolution. Les DSR dorment tranquillement dans les cuves et ne bougent pas. Nous les laissons dormir en les surveillant sans les chatouiller* », résume-t-il avec humour.

## La propagation est évaluée

Isabelle Delvallée, ingénieure-chercheuse de l'IRSN, a fait partie d'un groupe d'experts internationaux chargé d'évaluer le risque lié à des anomalies dans l'acier de la cuve du réacteur 1 de la centrale suisse de Beznau. Ces dernières sont détectées en 2015, lors de contrôles visant à confirmer l'absence de DDH. Cette fois, il s'agit d'amas d'inclusions d'oxydes d'aluminium observés en grand nombre. « *À la différence des DDH et des DSR, qui sont des fissures, ces amas d'inclusions sont comme de petits agglomérats de grains de sable, ne dépassant pas 3 mm de long. Des inclusions d'aluminium sont présentes dans toutes les cuves de réacteur du fait du procédé de fabrication des pièces en acier forgé. Leurs dimensions les rendent indécélables par les*

## PROCESS

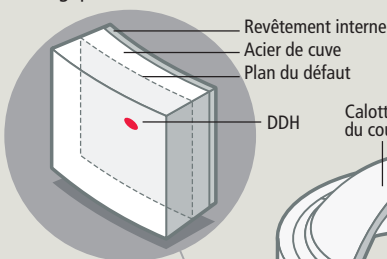
### Cuves de réacteur : différents défauts à surveiller

D'origines diverses, les anomalies ne se situent pas aux mêmes endroits dans l'acier des cuves. Une sonde à ultrasons est utilisée pour les localiser précisément.

#### Quels types de défauts ?

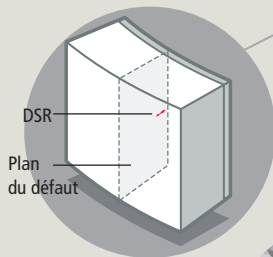
##### 1 Les défauts dus à l'hydrogène (DDH)

**Fissures parallèles** à la paroi de la cuve. Elles peuvent atteindre 10 cm, mais sont peu sollicitées mécaniquement. Ces défauts sont issus du forgeage de l'acier.  
> **Réacteurs concernés** : Tihange et Doel 3, en Belgique.



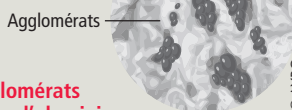
##### 2 Les défauts sous revêtement (DSR)

**Fissures perpendiculaires** à la surface interne des cuves. Elles mesurent au plus une dizaine de millimètres. Ces défauts sont issus du soudage.  
> **Réacteurs concernés** : Tricastin 1, Fessenheim 1 et 2, Blayais 2, Bugey 5 et Saint-Laurent B1 et B2, soit 7 cuves. Celle de Tricastin 1 est la plus affectée, avec une fissure de 12 mm.



##### 3 Les agglomérats d'oxydes d'aluminium

Ils se présentent sous forme d'**amas localisés**. Ils sont produits lors de la fonte du lingot d'acier.  
> **Réacteurs concernés** : Beznau 1 en Suisse.

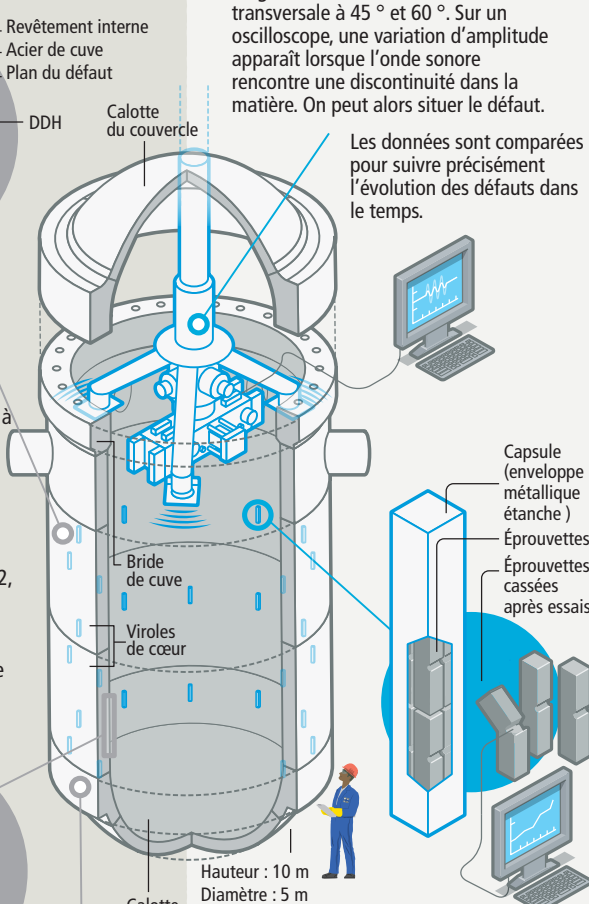


#### Quel type de surveillance ?

##### 1 Comment sont surveillés les cuves françaises et les défauts existants ?

EDF réalise un contrôle décennal des cuves. Il surveille la taille des défauts existants. Il utilise une **sonde à ultrasons** immergée dans la cuve et pourvue de palpeurs à onde longitudinale à 0° et à onde transversale à 45° et 60°. Sur un oscilloscope, une variation d'amplitude apparaît lorsque l'onde sonore rencontre une discontinuité dans la matière. On peut alors situer le défaut.

Les données sont comparées pour suivre précisément l'évolution des défauts dans le temps.



##### 2 Comment est surveillée l'évolution réelle du matériau de cuve ?

Pour chaque cuve, **28 capsules** contiennent des **éprouvettes** issues du même matériau que la cuve ainsi que des dosimètres. Placées à la périphérie du cœur de réacteur, elles reçoivent un bombardement neutronique plus élevé que celui reçu par la paroi de la cuve afin d'anticiper son vieillissement. Les capsules sont extraites à plusieurs années d'intervalle. Les éprouvettes sont testées par EDF pour vérifier que l'exploitation de la cuve est toujours compatible avec son vieillissement.





Viroles de générateur de vapeur

ultrasons », précise Isabelle Delvallée. L'autorité suisse de sûreté nucléaire demande au groupe d'experts de vérifier qu'elles ne dégradent pas les caractéristiques mécaniques de la cuve. L'ingénieure, qui étudie depuis plus de quinze ans les cuves françaises, évalue la ténacité de l'acier et le risque qu'un défaut puisse s'agrandir. Pendant deux ans, avec six confrères<sup>2</sup> du monde entier, elle analyse les données, multiplie les échanges...

## Une campagne d'essais

Elle participe à l'élaboration d'une campagne d'essais sur une réplique de virole réalisée selon le procédé de fabrication employé dans les années 1960 lors de la production de la cuve du réacteur Beznau 1 : « Elle présente les mêmes défauts, ce qui confirme que nous avons bien cerné l'origine du problème », souligne Isabelle Delvallée. Des tests sont menés sur des échantillons de matière prélevés dans différentes zones de la virole, avec plus ou moins d'inclusions. Ils démontrent que les agglomérats d'inclusions d'oxydes d'aluminium dans l'acier de la cuve n'en dégradent ni la ténacité, ni la tenue mécanique en conditions normales et accidentelles. « Participer à un tel groupe de travail est enrichissant. Je me suis confrontée à des pratiques d'évaluation de la sûreté différentes de la mienne », témoigne la mécanicienne de la rupture. ■

1. Cylindres métalliques utilisés comme éléments de construction d'enceintes ou de réservoirs cylindriques.

2. Mark Kirk (US NRC, États-Unis), Randy Nanstad (ex-ORNL, États-Unis), Guy Roussel (Bel-V, Belgique), Hans-Jacob Schindler (Mat-Tec AG, ETHZ, Allemagne), Hans Vandriessche (Association Vincotte Nucléaire, Belgique), Tim Williams (ex-Rolls-Royce, Royaume-Uni).

## En tant que représentant de la société civile, quel est votre rôle ? Comment l'exercez-vous ?

Depuis 1983, WISE Paris propose une expertise non institutionnelle aux acteurs de la gouvernance nucléaire. L'idée est d'apporter un éclairage sur les enjeux et les risques pour favoriser le dialogue et faciliter la décision publique. Sur le dossier des cuves, nous travaillons notamment à partir des analyses fournies par l'IRSN. Nous ne proposons pas une contre-expertise technique, mais plutôt une mise en perspective systémique.

## Quelle est votre perception de la sûreté des cuves en France ?

Les cuves sont essentielles. Dès leur conception, des marges de sécurité importantes sont prises, et elles font l'objet de suivi. Ce n'est peut-être pas l'élément le plus préoccupant. On ne peut pas exclure, dans le contexte actuel, qu'il existe en amont des malfaçons cachées et en aval, des dégradations non perçues, voire non signalées.

On ne prend pas assez en compte les incertitudes liées au vieillissement du matériau, qui consomme les marges de sûreté prévue initialement. Il faut une discussion publique sur ce sujet : jusqu'où peut-on consommer ces marges ?

## Qu'attendez-vous de l'IRSN et de l'exploitant ?

Il faut que toute l'information sur le suivi et les défauts des cuves soit plus accessible. Nous voulons notamment avoir accès aux échanges entre l'IRSN et EDF.

## 3 questions à...

Yves Marignac

Directeur de WISE Paris



© B. Runtz



Centrale nucléaire de Beznau, en Suisse.

© AXPO

## AILLEURS

# Comment sont contrôlées les cuves en exploitation dans le monde

**A**ux États-Unis et au Japon – pays qui, comme la France, détiennent le plus grand nombre de réacteurs –, l'exploitant réalise un contrôle initial, mais aucun suivi n'est effectué, exception faite des joints soudés de la cuve.

La France est le seul pays à examiner systématiquement par ultrasons toute la hauteur de la paroi des cuves en face

du cœur : depuis la fin des années 1990, le matériau derrière le revêtement est contrôlé tous les dix ans. C'est en calquant leur démarche sur celle des Français que les Belges ont détecté des défauts dans l'acier de leurs cuves.

**WWW** Pour en savoir plus :  
[www.nrc.gov](http://www.nrc.gov)  
[www.nsr.go.jp](http://www.nsr.go.jp)  
<https://fanc.fgov.be>



## L'environnement sur le grill !

Cette élégante flûte traversière aux couleurs orangées n'est autre que l'intérieur d'un four à fusion alcaline. Son objectif ? Mettre en solution des échantillons de matière issus de l'environnement pour mesurer la présence d'éléments radioactifs – uranium, plutonium, américium... Il est possible de l'utiliser pour tout type de matrice environnementale, c'est-à-dire des échantillons de terre, sols, sédiments, végétaux, herbe, produits laitiers... Six éléments différents peuvent être mesurés en une seule journée. Les chercheurs en mesure de la radioactivité

dans l'environnement de l'IRSN ont acquis ce dispositif en 2015. Au départ, il s'agissait d'un outil de recherche. Aujourd'hui, ce four est utilisé en routine, au moins deux semaines par mois, pour surveiller la présence de radionucléides dans l'environnement. Il permet d'analyser très rapidement et efficacement de petits échantillons. L'Institut emploie également ce matériel pour s'exercer à la gestion d'une crise, comme un accident dans une centrale nucléaire. Aujourd'hui, d'autres techniques sont employées : l'utilisation d'acides sur une plaque chauffante portée à 80-100 °C, un

**Béatrice Boulet**  
**Azza Habibi**

Ingénieures-chercheuses en mesure de la radioactivité dans l'environnement.

four à micro-ondes... Mais elles s'avèrent moins sécurisées, moins performantes et moins rapides.

Comment fonctionne ce four à fusion alcaline ? L'échantillon de moins d'un gramme est ajouté à un fondant avec une température de fusion à 850 °C, ainsi qu'un agent mouillant. Après quelques minutes de chauffage à 1 000 °C, une lave est obtenue puis versée dans un bécher contenant de l'acide. Après agitation et purification sur des colonnes chromatographiques, la solution est prête pour la mesure de ses radio-isotopes. ■





620 000

actes de radiologie interventionnelle sont pratiqués chaque année par des radiologues. À cela s'ajoutent ceux réalisés par des cardiologues, neurologues, chirurgiens...

Source : Fédération de radiologie interventionnelle

Service de neuroradiologie interventionnelle de l'hôpital Pasteur 2, à Nice (Var).



# Radiologie interventionnelle

## La radioprotection s'améliore

Du lit des malades jusqu'à l'IRSN en passant par les autorités publiques et les sociétés savantes, des professionnels se mobilisent pour sécuriser les actes de radiologie interventionnelle. Une technique médicale performante mais pas sans risque. Son utilisation croissante doit être accompagnée de règles de radioprotection pour les patients et les praticiens.



L'étude Coccinelle étudie les effets de la cardiologie interventionnelle sur les enfants.

© Tempura/Stock/Getty



Intervention de vertébroplastie pour traiter une fracture vertébrale à l'hôpital Pasteur 2 à Nice (Alpes-Maritimes).

© A. Noor/BSIP

Les niveaux de référence en interventionnel (NRI) arrivent ! Le décret ministériel a paru au *Journal officiel* le 4 juin dernier. L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) doit désormais préciser les conditions de leur application. Une décision sera publiée pour que ces outils essentiels de la radioprotection des patients entrent en application. Quand une personne bénéficie de la radiologie interventionnelle, elle peut être exposée à des quantités de rayons X plus importantes que celles utilisées en radiologie diagnostique (voir lexique p. 15). Chercheurs et acteurs de terrain s'attendent à mieux connaître les risques, les évaluer et trouver des solutions d'optimisation.

La radiologie interventionnelle consiste à réaliser des actes médicaux à l'intérieur du corps du patient en les visualisant grâce à des appareils de radiologie. Le trajet des instruments ou du produit de contraste est suivi sur un écran affichant des radiographies du patient « en rafale ». « *Des gestes opératoires qui seraient impossibles autrement deviennent réalisables grâce à la radiologie interventionnelle. Elle limite de nombreux risques médicaux en évitant des chirurgies lourdes et leurs éventuelles complications...* », rappelle Cécile Étard, experte en radioprotection médicale à l'IRSN. « *Le rôle de l'Institut est de se préoccuper des risques liés aux rayonnements* », précise-t-elle.

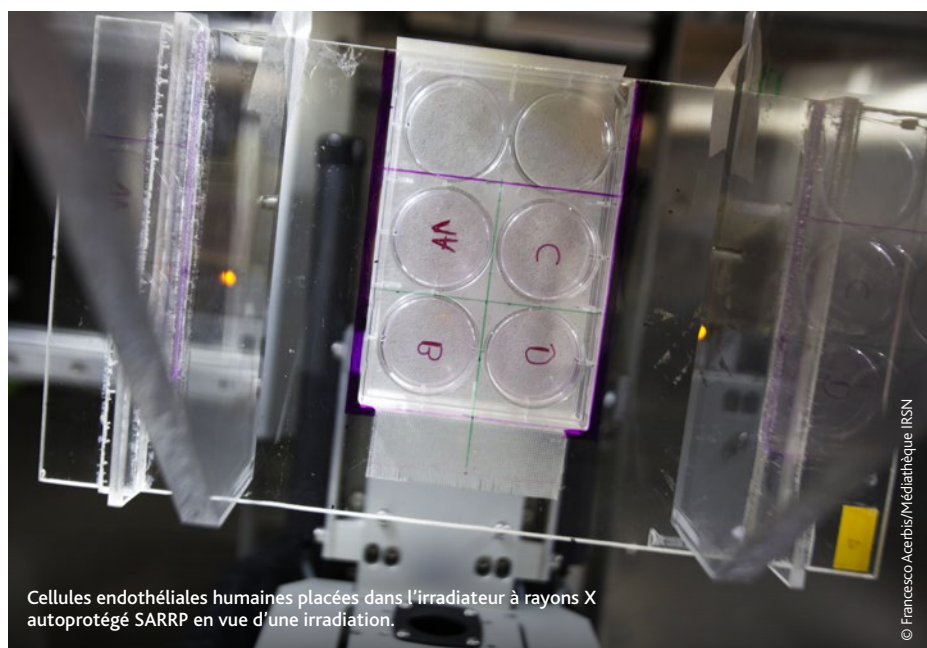
Bientôt, tous les services médicaux pratiquant la radiologie interventionnelle seront invités à transmettre à l'IRSN – via le site [nrd.irsn.fr](http://nrd.irsn.fr) – des informations concernant les doses de rayons délivrées aux patients puis à les comparer aux NRD. Ils pourront évaluer leurs pratiques, examiner les causes de leurs écarts et mettre en place des mesures correctives.

Des travaux sont réalisés pour comprendre quels



Amélie Fréneau est chercheuse au sein du laboratoire de radiologie des expositions accidentelles.

© Céline Letache/Médiathèque IRSN



Cellules endothéliales humaines placées dans l'irradiateur à rayons X autoprotégé SARRP en vue d'une irradiation.

© Francesco Acerbis/Médiathèque IRSN

## “ Les physiciens médicaux en radiologie interventionnelle sont encore trop peu présents dans de nombreux établissements.

actes et quelles doses sont responsables de quels effets, sur quels patients... L'étude Coccinelle a recueilli les informations nécessaires à la reconstruction dosimétrique concernant 16 000 enfants ayant bénéficié d'actes de cardiologie interventionnelle dans quinze centres de cardiologie pédiatrique en France. « *Les enfants sont plus sensibles aux radiations. Ils ont aussi une espérance de vie plus longue après la ou les procédures, donc une probabilité plus importante de développer une pathologie au cours de leur vie. Nous disposons d'une bonne durée de suivi pour observer l'éventuelle survenue d'un cancer* », explique Estelle Rage, pharmacienne et épidémiologiste à l'IRSN, qui prend la suite de ces travaux initiés par Hélène Baysson, épidémiologiste à l'Institut.

### Comprendre les effets des rayons

Dans sa thèse, Amélie Fréneau cherche, quant à elle, à mieux comprendre les effets des rayons sur les cellules : « *Les rayons X utilisés en radiologie interventionnelle – et en mammographie – sont dits de basse énergie<sup>1</sup>. Leurs interactions avec la matière sont différentes, ce qui justifie leurs utilisations spécifiques en imagerie médicale. Cependant, les dommages moléculaires spécifiques qu'ils seraient susceptibles de provoquer, notamment à l'ADN, sont peu étudiés* », explique-t-elle. Les observations de la thésarde sur des cellules en culture et avec des rayons de très basse énergie montrent de légères différences par rapport aux rayons utilisés en radiothérapie, seu-

# 64 %

des doses reçues par les travailleurs du médical proviennent de la radiologie interventionnelle.

lement à partir d'un certain niveau de dose – plusieurs Gy. À ce stade, ces travaux ne remettent pas en cause l'idée d'extrapoler les modèles de risques utilisés en radiothérapie pour évaluer les risques de la radiologie interventionnelle.

### Des appareils plus performants

Le Dr Jean-Louis Georges, cardiologue au centre hospitalier de Versailles (Yvelines), travaille au sein d'une équipe de cardiologie interventionnelle sensibilisée à la radioprotection. Il a publié deux études (RAY'ACT 1 et 2) sur des données recueillies auprès de 44 centres français en 2010 puis 2013. En trois ans, les praticiens ont réduit les doses délivrées de plus de 20 %. Des résultats qui s'expliquent par plusieurs facteurs. Certains centres ont changé d'équipements entre les deux enquêtes. Les nouveaux appareils sont plus performants, ils sont par exemple équipés de dispositifs comme un centrage automatique. La plupart des centres travaillent désormais avec des cadences d'images plus faibles – ils sont passés de 15 à 7,5 images par seconde. « *Ils ont aussi appris à bien coller le détecteur au patient et à placer ce dernier loin de la source, complète le cardiologue. Toutes ces actions conduisent à de petites baisses. Ajoutées les unes aux autres, elles aboutissent à des résultats significatifs.* » Malgré ces progrès, la rigueur reste de mise. « *Avec des patients en surpoids ou obèses nous devons augmenter les doses délivrées. Même dans le cas de procédures peu irradiantes, il faut minimiser les doses. Nous ne connaissons pas ce que le patient va subir par ailleurs, plus tard, et qui pourrait l'exposer à des irradiations cumulées* », poursuit-il.

En 2012, la Haute Autorité de santé (HAS) publie un guide méthodologique pour la radioprotection des patients. Elle y aborde les pratiques de radiologie interventionnelle. Le guide propose des actions de formation et invite les praticiens à se poser les bonnes questions avant de pratiquer un acte. En



2014, un autre rapport préconise la mise en place de seuils d'alerte visant à assurer un meilleur suivi des patients (voir infographie).

Au CHU de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme), Joël Guersen, coordonnateur de la radioprotection, met en œuvre les recommandations et cherche à faire progresser les connaissances. Il travaille avec une dermatologue qui a consacré sa thèse aux cas de radiodermites chroniques induites par la radiologie interventionnelle. Sur la période 2010-2016, « seulement » 8 patients ont été concernés, sur 55 782 procédures réalisées.

## Réparer les lésions

Ces lésions ne sont pas toujours évitables quand il s'agit d'interventions médicales longues. Mais « ces brûlures sont très douloureuses et les traitements conventionnels ne sont pas toujours efficaces pour les soigner », note le Pr Éric Bey, chirurgien plasticien à l'Hôpital d'instruction des armées à Percy (Hauts-de-Seine), et spécialiste de la réparation de ces lésions. Il travaille avec l'IRSN pour développer de nouvelles techniques, combinant chirurgie réparatrice par lambeaux et injection de cellules souches destinées à stimuler la régénération des tissus abîmés et améliorer les conditions environnementales péri- et post-chirurgicales.

On pourrait aussi imaginer de mieux « dépister les patients à risque, ceux qui ont subi des examens radiologiques nombreux et répétés pour éventuellement prélever chez eux des cellules souches et les préparer en laboratoire. Elles seraient utilisées après un examen radiologique pour prévenir et réparer les éventuelles brûlures ».

L'ASN réalise régulièrement des inspections dans les services médicaux. Globalement, elles mettent en évidence une prise de conscience des risques par les professionnels, comme le relève Philippe Ménéchal, inspecteur pour la région du Grand-Sud-Ouest : « Depuis dix ans, nous avons vu une bonne évolution de la formation des médecins à la radioprotection. Les infirmières de bloc opératoire vont désormais avoir l'obligation de se former. Mais pour certains praticiens ou dans certains établissements qui pratiquent peu d'actes ou des actes courts, ce n'est encore qu'un frémissement... » ■

1. De l'ordre de quelques dizaines de kilo-électrons-volts, contre une énergie de plusieurs méga-électrons-volts pour ceux utilisés en radiothérapie

2. <http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Organisation/equipes/radioprotection-homme/Lepid/Pages/Lepid-cohorte-Coccinelle.aspx#.WOT15dgzZTY>

WWW À LIRE SUR LE WEBMAGAZINE

Interventionnel : quels risques pour les patients ? [www.irsn.fr/R39](http://www.irsn.fr/R39)

## EN CLAIR

### Des seuils d'alerte pour réduire les risques de la radiologie interventionnelle

Pour les interventions de radiologie interventionnelle, la Haute Autorité de santé (HAS) a établi des seuils d'alerte et prévu des actions à mettre en place en cas de dépassement. Les patients à risques sont suivis et pris en charge en cas d'effets indésirables.

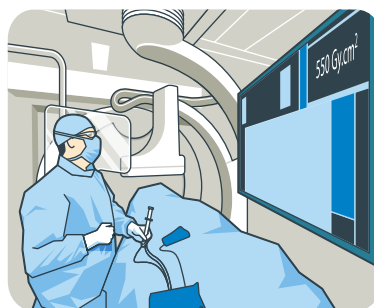


#### 1 Consultation pré-intervention

Paul va subir une intervention de radiologie interventionnelle. Quelques semaines avant, la radiologue l'informe des bénéfices et des risques éventuels d'érythème ou brûlure au niveau de la peau.

#### 2 Pendant l'intervention, le seuil d'alerte est dépassé.

Tout au long de la procédure, le praticien suit la dose délivrée sur un écran. Il peut régler la qualité d'image et interrompre l'intervention si le risque encouru dépasse le bénéfice attendu. En raison du surpoids du patient et de la complexité de la procédure, le médecin doit utiliser des doses de rayons importantes. Le produit dose-surface dépasse les 500 Gy.cm<sup>2</sup>, seuil d'alerte défini par la HAS, sans que le praticien puisse l'éviter.

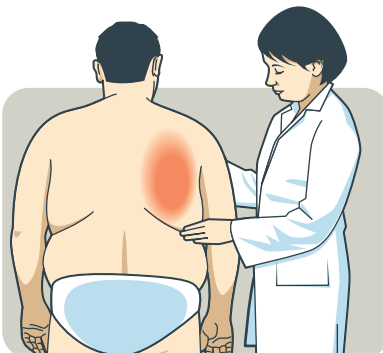


#### 3 Un suivi est mis en place

Le radiologue informe le patient et lui délivre une fiche d'autosui : symptômes à surveiller, délais d'apparition, coordonnées des professionnels à contacter. Le médecin traitant est informé et invité à suivre l'apparition d'éventuels effets. Symptômes ou pas, une consultation de suivi est programmée dans trois mois.

#### 4 Des lésions apparaissent

Deux semaines plus tard, Paul ressent une brûlure au niveau de la peau. Sans traitement, les effets pourraient s'aggraver. Le patient contacte le service qui a pratiqué l'intervention. Il est immédiatement orienté vers un dermatologue.



#### 5 Le patient est traité

Sa douleur est prise en charge et un suivi dermatologique est mis en place. Dans le cas de Paul, il s'agit d'effets transitoires, qui vont s'estomper comme un coup de soleil. Dans de rares cas, quand la dose à la peau dépasse 20 Gy, les tissus peuvent se nécroser et la lésion peut nécessiter une greffe de peau.

# Radiologie interventionnelle : des risques pour les professionnels

En radiologie interventionnelle, les personnels médicaux ne pensent pas toujours à leur propre radioprotection. Peu à peu, les risques de cataracte et éventuellement de cancer liés à leur activité se font jour. La formation progresse et les moyens de protection se répandent.

**Q**uatre fois plus d'opacités cristalliniennes au niveau sous-capsulaire postérieur chez les cardiologues interventionnels que dans la population générale. Ce résultat est le fruit de l'étude O'Cloc<sup>1</sup>. Ce type de cataracte est caractéristique de lésions oculaires causées par les rayons. Cette étude épidémiologique a été menée par Sophie Jacob, du Laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants (Lepid) à l'IRSN. Elle met au jour un risque important lié à la radiologie interventionnelle pour les professionnels. Les travaux ont porté sur une centaine de praticiens en France. Ce risque avéré a alimenté les discussions sur les nouvelles normes de radioprotection.

Pour préciser le rapport entre dose et risque, une nouvelle étude baptisée Euroloc, portant cette fois sur 400 cardiologues dans 11 pays, a été lancée. Coordonnée par le SCK-CEN, organisme belge avec lequel l'IRSN collabore, elle « *confirme l'augmentation du risque de cataracte et précise le rapport dose/réponse. Le risque de développer cette pathologie augmente de 30 % pour chaque gray (Gy) reçu à l'œil* », commente Isabelle Clairand, spécialiste de la dosimétrie à l'IRSN. Une analyse statistique est en cours pour mieux connaître la distribution de doses : les scientifiques souhaitent connaître la proportion des travailleurs ayant reçu une quantité de rayonnements faible, moyenne, forte... Les chercheurs diffusent ces résultats à travers des publications et des communications dans les congrès pour sensibiliser les cardiologues à ce risque et les inciter à se protéger.

Les moyens de protection existent. Le premier est d'éviter de pratiquer des actes inutiles, et de limiter les doses délivrées, la durée des interventions, la quantité d'images... Il s'agit aussi d'utiliser les équi-



pements de protection efficaces : tablier, veste, lunettes plombées, paravents.

Les personnes compétentes en radioprotection (PCR) – désormais conseillers en radioprotection – formées et désignées pour assurer la radioprotection des travailleurs, y veillent. Elles réalisent des études de poste pour évaluer leur exposition et adaptent les mesures de protection. Elles préconisent si besoin une dosimétrie spécifique pour certains d'entre eux, pour la mesure de la dose au cristallin (près des yeux) et aux extrémités (bague au doigt).

## Protéger les professionnels

Plusieurs dosimètres existent pour ces usages particuliers, dont un développé par l'IRSN. « *L'ergonomie est essentielle. Ils doivent être assez discrets, légers et confortables pour ne pas gêner les praticiens, mais assez gros pour ne pas être perdus en retirant ses gants par exemple; assez robustes pour ne pas se casser à l'usage; bien conçus pour ne*

*pas tomber pendant une intervention... Ils doivent résister aux traitements de stérilisation entre deux patients* », explique Nathalie Bolteau, du laboratoire de dosimétrie.

Les valeurs mesurées sur les dosimètres sont transmises à l'IRSN dans Siseri (Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants) comme toutes les mesures dosimétriques des travailleurs exposés. Après l'analyse de ces données, les experts établissent un bilan annuel de l'exposition des travailleurs. Depuis 2016, un chapitre spécifique est consacré à la dose au cristallin chez les professionnels de santé. Sandrine Roch-Lefèvre a coordonné le bilan 2018 : « *50 % des travailleurs dont la dose au cristallin est surveillée exercent en radiologie interventionnelle. Et ces professionnels cumulent 64 % de l'exposition totale du secteur médical. Les plus fortes doses aux mains et aux yeux surviennent dans cette discipline, tous travailleurs confondus. On y trouve trois des*



quatre doses enregistrées qui auraient dépassé la nouvelle limite réglementaire au cristallin de 20 mSv<sup>2</sup>. » Compte tenu du risque de cataracte avéré, la limite a été ramenée de 150 à 20 mSv par an.

Le risque accru de tumeur cérébrale est également à l'étude chez les chirurgiens réalisant des actes radioguidés. Plusieurs cas de cancers cérébraux chez des cardiologues ont été rapportés dans des publications. Ils sont plus fréquents du côté gauche du cerveau, le côté le plus exposé aux faisceaux de rayons lors des interventions. Sur ce sujet, le Lepid a lancé une nouvelle étude : O'Ricams<sup>3</sup>. Elle porte sur 200 000 professionnels de santé exposés aux rayonnements. Les chercheurs vont déterminer si leur risque de cancer du cerveau est supérieur à celui d'une population témoin non exposée. Marie-Odile Bernier, à la tête de cette étude, « espère publier des résultats d'ici à 2020 ».

## Une sensibilisation dès l'internat

« La radiologie interventionnelle est en croissance exponentielle, note le Dr Jean-Michel Bartoli, qui vient de céder sa place de président de la Fédération de radiologie interventionnelle, au sein de la Société française de radiologie (FRI-SFR). Deux ou trois nouvelles indications se développent tous les ans, par exemple, le traitement des adénomes de la prostate symptomatiques par embolisation ou le traitement des hémorroïdes graves par occlusion endo-artérielle. »

Les radiologues, spécialistes des rayons, sont formés dès le début de leur internat à la radioprotection et sensibilisés tout au long des cinq années de spécialisation. « La récente réforme de ce 3<sup>e</sup> cycle d'études a créé une spécialité de radiologie interventionnelle "avancée" en six années, comme pour les chirurgiens. Elle vise à apprendre des techniques complexes, alors même que tous les radiologues sont formés pour la réalisation des actes simples – », ajoute-t-il. Depuis 2004, les autres professionnels de santé utilisant les rayons – cardiologues, neurologues – ont également une obligation

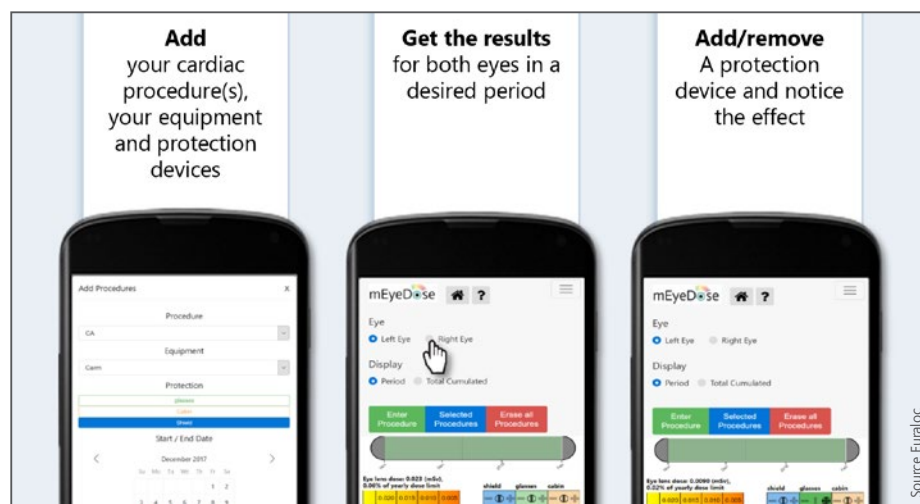
de se former à la radioprotection et d'indiquer les doses délivrées dans les dossiers des patients.

Le Dr Hélène Vernhet Kovacsik, qui a repris les rênes de la FRI-SFR, compte sur l'intelligence artificielle pour aider les praticiens dans leur démarche de radioprotection : « Dès 2020, des programmes d'intelligence artificielle devraient trouver plus facilement le meilleur compromis de dose en fonction de la morphologie du patient, de son poids, de l'acte à réaliser... » ■

1. Occupational Cataracts and Lens Opacities in Interventional Cardiology; en français, « cataractes et opacités du cristallin d'origine professionnelle en cardiologie interventionnelle »
2. Décret n° 2018-437 du 4 juin 2018.
3. Occupational Radiation-Induced Cancer in Medical Staff; en français, « cancer d'origine radiologique chez le personnel médical »

## À LIRE SUR LE WEBMAGAZINE

Pratiques interventionnelles radioguidées : vers plus de sécurité



## LEXIQUE

### La dose en radiologie interventionnelle

La **dose d'entrée** est la dose absorbée au niveau de la peau du patient, due au faisceau de rayons X et au « halo » de rayonnements diffusés. Elle est exprimée en grays (Gy).

Le **produit dose-surface (PDS)** : la dose de rayons administrée multipliée par la surface de peau exposée rend mieux compte des risques que la dose seule. Le PDS est exprimé en Gy.cm<sup>2</sup>. Pour des actes très courts et peu dosants (moins d'une minute de scopie) le PDS se situe aux alentours de 5 à 10 Gy.cm<sup>2</sup>. À l'opposé, le PDS pour des actes très longs (environ 60 minutes de scopie) se situe aux alentours de 250 à 300 Gy.cm<sup>2</sup>.

Un PDS de 200 Gy.cm<sup>2</sup> correspond à une dose d'entrée de 2 Gy pour une surface de peau exposée de 100 cm<sup>2</sup>.

## OUTIL

# La dose au cristallin estimée par une application mobile, MEyeDose

Une application pour smartphone<sup>1</sup> a été conçue pour calculer l'exposition des yeux des cardiologues aux rayonnements ionisants en fonction des actes qu'ils pratiquent. Pour cela, rien de plus simple pour eux : ils renseignent les paramètres de leur activité : type et nombre de procédures, appareil d'imagerie, équipements de protection... et l'application évalue, en fonction de données préalablement relevées pour le même type d'actes, la dose

au cristallin du praticien. Celui-ci peut enregistrer les données et surveiller sa dose cumulée au fil du temps. Cette application peu connue a fait l'objet d'une publication dans la *Journal of Radiological Protection*. Quatorze instituts de recherche se sont associés pour développer EyeDose, dont l'IRSN, sous le pilotage de l'organisme belge SKN-CEN.

<sup>1</sup> www.meyedose.eu, disponible en anglais uniquement.



1



2

Photos © Sophie Brändström/Signatures/Médiathèque IRSN

- 1 Joël Greffier (à gauche), physicien médical sensibilise Julien Frandon, radiologue à l'optimisation des pratiques.
- 2 Les professionnels portent un équipement obligatoire : tablier, lunettes, protège thyroïde plombé.
- 3 Grâce à des protections plombées transparentes, le médecin voit son patient tout en protégeant ses mains et le haut de son corps des rayonnements.
- 4 Ces plaques permettent à Joël Greffier de contrôler la constance dans le temps des paramètres d'exposition.

**REPORTAGE** Près de 9 500 interventions guidées par rayons X sont réalisées par an dans les quatre salles du centre d'imagerie interventionnelle du CHU de Nîmes (Gard). Aucune n'échappe à la vigilance du physicien médical, Joël Greffier, et à ses instructions aux professionnels en matière de radioprotection.

CHU de Nîmes

## La radioprotection en actions



3



4

### ■ BIBLIOGRAPHIE

Rapport de la HAS « Améliorer le suivi des patients en radiologie interventionnelle et actes radioguidés. Réduire le risque d'effets déterministes » [www.has-sante.fr](http://www.has-sante.fr)

Rapport de la SFPM « Niveaux de référence en radiologie interventionnelle » [www.sfpfpm.asso.fr](http://www.sfpfpm.asso.fr)

Guide de la HAS « Radioprotection du patient et analyse des pratiques, DPC et certification des établissements de santé » [www.has-sante.fr](http://www.has-sante.fr)

Étard C. et al., « Patient dose in interventional radiology: a multicentre study of the most frequent procedures in France », *Eur Radiol* 2017 ; 27 ; 4281–4290

Harbron R.W. et al., « Patient radiation doses in paediatric interventional cardiology procedures: a review », *J. Radiol. Prot.* 36 (2016) R131–R144

Baysson et al., « Follow-up of children exposed to ionizing radiation from cardiac catheterization : the Coccinelle study », *Radiation Protection Dosimetry*, 2015

Bamaoui S. et al., « Local Reference Levels and Organ Doses From Pediatric Cardiac Interventional Procedures », *Pediatr Cardiol* 2014

« Radiologie interventionnelle : protéger son patient », *Repères* n° 20.

« Cristallin : les yeux sous haute radioprotection », *Repères* n° 22.

### ■ CONTACTS

Cécile Étard  
[cecile.etard@irsn.fr](mailto:cecile.etard@irsn.fr)

Sophie Jacob,  
[sophie.jacob@irsn.fr](mailto:sophie.jacob@irsn.fr)

Une première au CHU de Nîmes ! Les yeux sur son écran, le Dr Julien Frandon, responsable de l'unité de radiologie interventionnelle, embolise l'artère prostatique de son patient dans le cadre d'un protocole de recherche sur le cancer de la prostate. Il introduit un fin cathéter dans l'artère fémorale et le fait remonter jusqu'à la prostate pour y injecter un produit qui bouchera l'artère. Le but de cette technique : « couper les vivres » à la tumeur et implanter un principe actif pour détruire les cellules cancéreuses. Joël Greffier, physicien médical, veille à la radioprotection : « Le médecin a monté la table d'opération aussi haut que possible pour éloigner le patient de la source de rayons. Il a rapproché le patient du détecteur, limité la fréquence d'images – pulses de scopie – au minimum, et a utilisé le zoom numérique pour grossir l'image. »

Joël Greffier a créé dans ce service un premier niveau d'alerte plus bas que celui imposé par la Haute Autorité de santé (HAS) : un PDS de 200 Gy.cm<sup>2</sup> contre les 500 fixés par l'Autorité. En cas de dépassement de

ce seuil, il vérifie que le praticien suit la procédure : prévenir le patient de l'éventuelle survenue d'un effet déterministe, transmettre une fiche d'auto-suivi, prévoir une consultation de suivi... Pour les procédures les plus exposantes, il mesure ou calcule le maximum de dose à la peau. Cette évaluation vise aussi à comprendre le déroulement de la procédure afin de sensibiliser le praticien sur l'amélioration de ses pratiques.

La radioprotection des travailleurs est également de mise : médecins et manipulateurs portent des protections plombées : chasuble ou veste et jupette et protège-thyroïde. Le médecin – situé au plus près du patient et des rayons – porte également des lunettes de protection. Il reste derrière un bas-volet plombé sous la table et une suspension plafonnrière plombée transparente au-dessus.

Grâce au travail quotidien de Joël Greffier et de ses deux collègues PCR, Florence Boury et Cyril Duverger, la culture de radioprotection est bien présente dans cette unité. ■





Nucléaire civil ou militaire, laboratoire de recherche... des professionnels sont confrontés à des risques de contamination cutanée à l'uranium.

Calixarène

# Un traitement d'urgence pour la contamination cutanée à l'uranium

**L'ESSENTIEL** Les premiers produits de décontamination de la peau exposée à l'uranium, au plutonium, à l'américium et au thorium sont à la disposition des professionnels et des médecins du travail. Des chercheurs de l'IRSN ont mis au point une nanoémulsion à base de calixarène qui bloque le radioélément au niveau de la peau et réduit son passage dans le sang. Cette découverte a fait l'objet d'un transfert de technologie avec un industriel, le laboratoire Cevibra.

**TÉMOIGNAGE** Un spécialiste du risque nucléaire. **DÉCRYPTAGE** Mieux piéger l'uranium sur la peau. **AVIS D'EXPERT** Un chercheur en effets sanitaires et biologiques des rayonnements.



Denis Josse

Conseiller technique dans le domaine des risques nucléaires, biologiques ou chimiques.

## TÉMOIGNAGE « La crème peut être appliquée sur la victime en urgence »

La crème calixarène est efficace pour la décontamination cutanée de l'uranium chez l'animal et nous attendons des preuves scientifiques pour confirmer ses effets sur l'homme<sup>1</sup>. Nous pourrions l'utiliser en urgence en cas d'accident dans une centrale, une usine du cycle du combustible ou un laboratoire. La valeur ajoutée de ce produit vient du fait qu'il permet d'initier la décontamination sans attendre de prendre une douche sur place. Actuellement, la prise en charge d'urgence consiste à déshabiller la personne exposée, lui demander de se moucher puis de nettoyer sa peau et ses cheveux sommairement, le plus rapidement possible. Le calixarène se présente sous forme de crème lavante en tube. Il est aisé de l'avoir à portée de main et de l'appliquer très vite sur la victime.

Des produits similaires existent en cas d'exposition à des produits chimiques.

Les essais sur l'animal montrent que ce décontaminant est plus efficace que le seul produit jusqu'alors recommandé dans le cas d'une telle contamination, le DTPA<sup>2</sup>. Ce chélateur<sup>3</sup> a le désavantage d'être présenté sous forme de solution en ampoule, moins facile d'utilisation que le calixarène.

Enfin, il faut rester prudent. Les essais sur l'animal ont été réalisés sur peau lésée. L'effet sur peau saine est-il aussi spectaculaire? ■

1. Le laboratoire Cévibra est en attente des premiers résultats d'utilisation de la crème sur l'homme.

2. Acide diéthylène-triamine-pentaacétate.

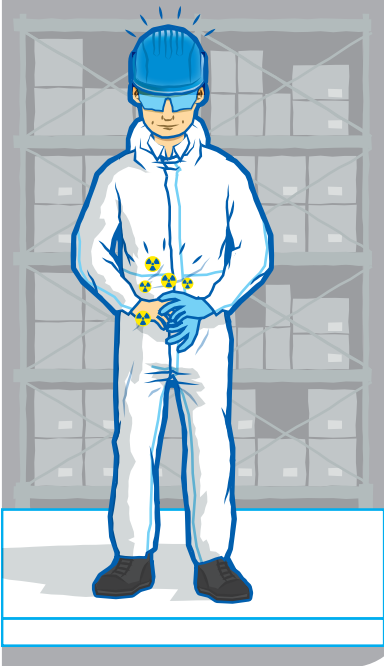
3. Substance chimique utilisée dans les intoxications aux métaux, et parfois dans les chimiothérapies.

# Mieux piéger l'uranium sur la peau

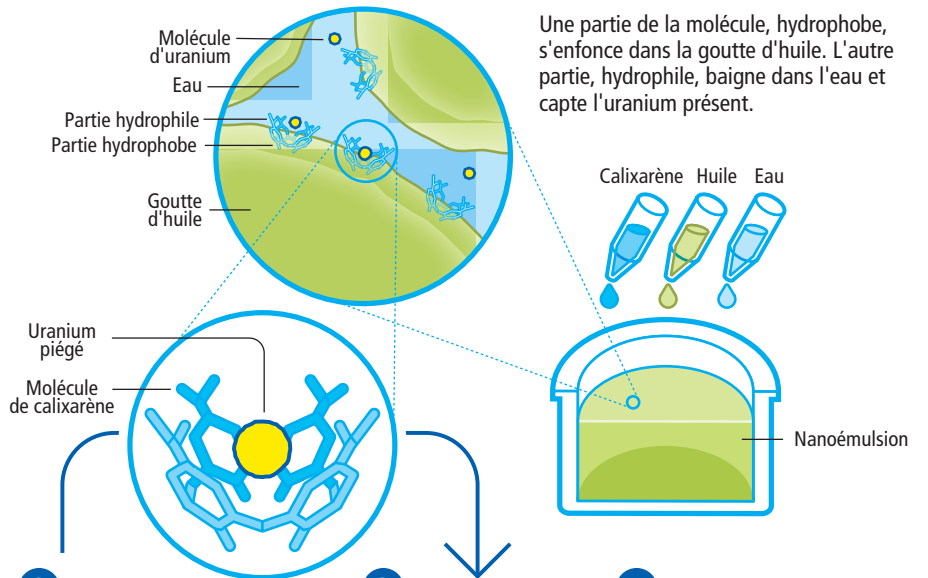
Des chercheurs de  
localement une  
commencé il y a  
de technologie. Le  
médecins du trava

## 1 La contamination cutanée à l'uranium.

Elle peut survenir lors du déshabillage, lors d'un accident dans une centrale, une usine du cycle du combustible ou un laboratoire. S'il n'est pas retiré rapidement, le radionucléide pénètre dans le sang et gagne les organes. Le protocole recommandé : un rinçage et l'administration d'une substance chimique éliminant les éléments radioactifs (décorporants).



© A. Dagani/Citizen Press/Médiathèque IRSN/Magazine Repères



Une partie de la molécule, hydrophobe, s'enfonce dans la goutte d'huile. L'autre partie, hydrophile, baigne dans l'eau et capte l'uranium présent.

## 2 L'IRSN mène des recherches sur le calixarène.

Le calixarène est une molécule capable de piéger l'uranium. Des chercheurs ont l'idée de la synthétiser pour tester son efficacité sur la peau. Des gouttelettes d'huile nanoscopiques portent les molécules de calixarène à leur surface et sont dispersées dans de l'eau. Cette nanoémulsion peut prendre la forme d'une **crème décontaminante** ou d'un **gel viscosant** qui durcit au contact de la peau.

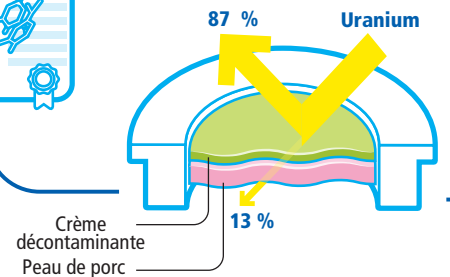
## 3 L'Institut dépose un brevet en 2008.

Il protège toutes les formulations à base de calixarène.



## 4 L'efficacité de ces produits est démontrée

dans une seconde thèse. La crème décontaminante **réduit de près de 87% la diffusion de l'uranium – nitrate d'uranyl –** à travers la peau de porc excoyée – dont la couche superficielle a été retirée.



Émulsion lavante pour une décontamination.

© Noak/Le Bar Floreal/Médiathèque IRSN

### LA CONTAMINATION

L'uranium reste présent sur toutes les surfaces où il a été déposé. Il peut donc être transféré vers des personnes qui ne se trouvaient pas initialement sur la zone de contamination, via les vêtements, des objets ou la peau.

### QUEL MODE DE CONTAMINATION ?

**53,9 %** par voie cutanée  
**44,3 %** par inhalation du radioélément  
**1,8 %** par ingestion

### DES CAUSES DIVERSES

Un accident dans une centrale, dans une usine du cycle du combustible ou un laboratoire. Un travailleur qui fait un mauvais geste en ôtant ses équipements de protection.

### LA DÉCONTAMINATION

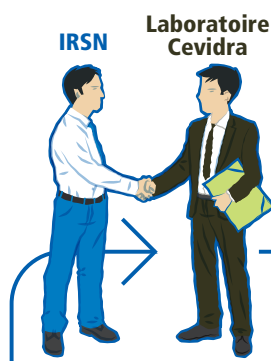
**À quoi sert la douche ?** Elle a pour objet d'éviter que l'uranium ne traverse la peau de la victime. Mais aussi de le faire totalement disparaître pour qu'il ne soit pas transféré vers quelqu'un d'autre.



l'IRSN ont développé une émulsion capable de traiter la contamination cutanée à l'uranium. Ces travaux ont duré une dizaine d'années et ont fait l'objet d'un transfert de technologie. Le dispositif médical est désormais à la disposition des industriels.

## 6 Une meilleure radioprotection des travailleurs.

En cas de contamination d'un professionnel, le médecin du travail dispose de trente minutes pour appliquer, sur place, le calixarène. Le professionnel sera ensuite évacué vers un service médical spécialisé. Le produit est également efficace en cas de contamination au plutonium, à l'américium et au thorium.



## 5 Un transfert de technologie est signé avec le laboratoire Cevindra.

Après des tests de toxicité réalisés sur l'animal, l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM) donne son accord pour que la crème décontaminante soit mise sur le marché, comme dispositif médical.



L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) recommandent un **nettoyage à l'eau et au détergent ou au DTPA** (un chélateur) si la peau est blessée. Une excision de la peau exposée est conseillée en cas de forte contamination.

### BIBLIOGRAPHIE

Thèse d'Aurélien Spagnol  
Thèse de Sophie Grivès  
[www.irsn.fr/these-spagnol](http://www.irsn.fr/these-spagnol)  
[www.irsn.fr/grives](http://www.irsn.fr/grives)

### CONTACT

#### Vous êtes un industriel intéressé par une invention de l'IRSN ?

Contactez le bureau innovation, intelligence stratégique, prospective et études (BIPE), et Isabelle Guyot, chargée de valorisation.  
[isabelle.guyot@irsn.fr](mailto:isabelle.guyot@irsn.fr)

#### Contactez le laboratoire :

Laboratoire de recherche en radiochimie, spéciation et imagerie IRSN - BP 17  
92 262 Fontenay-aux-Roses cedex  
Tél. : 01 58 35 90 53

## AVIS D'EXPERT



### François Rebière

Chimiste, spécialiste des effets biologiques et sanitaires des rayonnements

## Seul un organisme public pouvait développer le projet

À l'origine, l'objectif était de synthétiser une molécule capable de fixer l'uranium présent dans l'urine. Nous avons obtenu le calixarène. La clé de notre réussite est d'avoir mis en place une stratégie scientifique claire : associer cette molécule à une formulation adaptée pour lui trouver de nouvelles utilisations. Son avantage est bien réel. Pour autant, il s'agit d'un petit marché. C'est la raison pour laquelle ce projet n'aurait sans doute pas pu être développé ailleurs que dans un organisme public. Il aurait été difficile pour des acteurs privés de rassembler les fonds nécessaires. Une autre raison du succès est la mutualisation des compétences. Nous avons mis en place des partenariats avec la faculté de pharmacie de Châtenay-Malabry (Hauts-de-Seine), par exemple, ou avec le secteur privé. Nous avons signé un accord de licence avec le laboratoire Cevindra. Il nous a apporté sa vision d'industriel et ses connaissances réglementaires. Il assure sa commercialisation depuis le mois de juillet. La commercialisation d'une invention est gratifiante pour un chercheur, même s'il faut accepter de laisser à d'autres personnes le devenir de son invention. Une des clés de la réussite du transfert de technologie vers un industriel est l'accompagnement qu'il offre au quotidien. Le dépôt d'un brevet n'est pas une finalité, mais le début d'une aventure.



François Rebière  
[francois.rebiere@irsn.fr](mailto:francois.rebiere@irsn.fr)  
01 58 35 80 38

# Le public découvre le confinement dans l'argile

Dans un ancien tunnel ferroviaire des chercheurs étudient les propriétés de confinement de la roche argileuse. Ce laboratoire souterrain, situé à Tournemire (Aveyron) a ouvert ses portes au grand public, autour du thème : les mystères de l'eau dans l'argile. Une occasion pour les visiteurs de s'informer sur la radioactivité et le stockage des déchets radioactifs dans une formation argileuse.

## 1 Qu'est-ce que le laboratoire de recherche souterrain de Tournemire ?

En bordure sud du Massif central, dans l'Aveyron, l'IRSN mène des recherches dans un ancien tunnel ferroviaire de 1,9 kilomètre. Ce dernier a été creusé, il y a environ un siècle, au cœur d'une couche argileuse datant de 180 millions d'années, formée au jurassique, époque à laquelle la mer avait recouvert la terre. Située à plus de 200 mètres de profondeur, d'une épaisseur de 250 mètres, la couche est encadrée de formations calcaires. Par sa configuration géologique et la nature de

la roche – argilite, mélange d'argile et de calcaire –, le site présente de fortes similitudes avec celui étudié par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), en Meuse/Haute-Marne, pour le projet de stockage géologique profond de déchets nucléaires Cigéo. Ce laboratoire est un outil précieux pour mener des recherches indépendantes sur les propriétés de confinement d'une formation argileuse.

## 2 Pourquoi s'intéresser aux « mystères de l'eau dans l'argile » ?

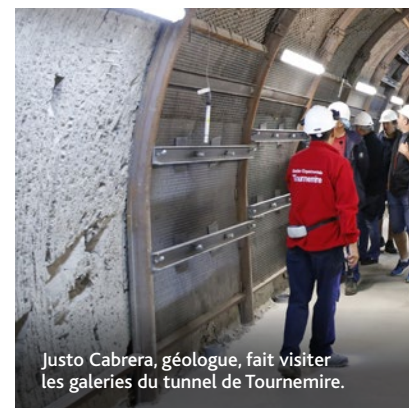
Lors de la visite du tunnel ferroviaire, le public a découvert les propriétés de l'argile : sa quasi-imperméabilité liée à sa structure, sa stabilité... Les pores microscopiques rendent les écoulements d'eau infiniment lents : de l'ordre de quelques centimètres par million d'années, soit une quasi-immobilité. Si des éléments radioactifs s'échappaient des colis de déchets radioactifs, ils seraient prisonniers du milieu argileux, enceinte naturelle de confinement, pendant de très longues durées. Durant la visite, le public a participé à deux ou trois expériences : peser la roche pour suivre la teneur en eau, tester la diffusion d'une substance dans l'eau... Les visiteurs ont eu un aperçu des recherches menées par l'Institut à Tournemire.



Au côté de Caroline Vignaud, ingénieure, Clément et Margot, deux jeunes visiteurs, cherchent à déterminer la présence de carbonate dans l'eau.



Le public a découvert les propriétés de la roche argileuse.



Justo Cabrera, géologue, fait visiter les galeries du tunnel de Tournemire.



## 3 Comment aider le public à comprendre les thématiques complexes ?

Cette journée portes ouvertes avait pour objectif de faire comprendre, en termes accessibles, des thématiques complexes liées au stockage et au confinement des matières nucléaires. Les quelque quarante collaborateurs de l'Institut mis à la disposition des visiteurs ont fait preuve de pédagogie, à travers des animations

ludiques, un espace « dialogue » pour répondre aux questions complémentaires, et des stands présentant les grandes caractéristiques de la radioactivité. Des visiteurs ont mesuré le pH de certaines substances, et même la radioactivité d'objets tels que de vieux réveils aux aiguilles peintes au radium.



Démonstration de la diffusion de l'eau dans la roche à partir d'une carotte résinée et perforée.

## 4 Quelles sont les recherches menées à Tournemire ?

Les recherches sur le site portent essentiellement sur les qualités de la roche argileuse : texture, porosité, imperméabilité, circulation des fluides dans ce milieu... Un champ d'études est consacré aux interactions entre l'argile et les matériaux de stockage, comme le béton ou l'acier. Cette question est importante pour la sûreté de l'entreposage. Sur place, les visiteurs ont vu à quoi ressemble une installation souterraine et saisi l'importance des scellements d'ouvrages pour assurer l'étanchéité du milieu. Beaucoup ont découvert la bentonite, un matériau peu connu, aux propriétés recherchées, car il gonfle à l'hydratation. Des recherches sont menées par l'IRSN dans d'autres champs, par exemple sur des capteurs de suivi des paramètres de contrôle d'ouvrages de stockage, mais n'ont pu être présentées lors de la journée.



Reportage photo © Sophie Brändström/Signatures/Médiathèque IRSN

## 5 Cette journée a-t-elle répondu aux attentes du public ?

Parmi les visiteurs, des couples avec enfants, des citoyens venus s'informer, des touristes...  
Jean Boussac, 64 ans, habitant à Béziers :  
« J'ai de la famille ici. Je suis venu à Tournemire pendant des années. Autrefois, je parcourais ce tunnel à pied. Je suis curieux de comprendre la géologie et la problématique des déchets. »  
Julie Vetter, aide-soignante, 30 ans :  
« Je suis venue avec mon fils pour faire une sortie

et apprendre des choses. Les présentations sont bien faites. C'est intelligent, ludique... »  
Pierre François, 62 ans :  
« Je m'intéresse à la question du confinement. Étant de formation scientifique, je n'ai pas appris grand-chose, mais la visite me permet d'avoir une vue plus concrète. »

www Pour en savoir plus  
[www.irsn.fr/tournemire](http://www.irsn.fr/tournemire)



# Transport des combustibles

## Un chargement sous haute radioprotection

Un colis contenant des assemblages de combustibles usés est en cours d'évacuation à la centrale de Belleville-sur-Loire (Cher). La sécurité des intervenants doit être assurée grâce à des procédures de radioprotection rigoureuses.

Dans le vestiaire de l'entrepôt où sont manutentionnés les colis d'assemblages de combustibles, les techniciens se préparent. Ils portent casques, lunettes, chaussures de sécurité et dosimètres : passifs et actifs, neutroniques et gamma. Ils revêtent des combinaisons blanches, des surchaussures et des gants de caoutchouc. Ces techniciens sont ceux d'EDF, du transporteur Orano TN et de SGS<sup>1</sup>. Ils entrent dans l'entrepôt où les attend un « château » de 120 tonnes, cylindre de 6 mètres de longueur et 2,5 mètres de diamètre, cet emballage destiné au transport d'assemblages de combustibles utilisés dans le cœur du réacteur. L'opération consiste à placer le colis sur le wagon qui le transportera vers l'usine de retraitement située à La Hague (Manche).

### 190 points contrôlés

Deux techniciens en radioprotection multiplient les contrôles de non-contamination du colis avec des chiffonnettes et des frottis : 190 points sont contrôlés. Les analyses sont réalisées en quelques minutes dans une camionnette-laboratoire. Par exemple, frottis sur château, zone capot arrière : 0,07 Bq/cm<sup>2</sup>. Pendant ce temps, l'expert en radioprotection de l'organisme de contrôle SGS refait les contrôles radiologiques avec ses propres instruments, un contaminamètre et un radiamètre. Cette duplication du contrôle sert à confirmer les mesures. Tous les gestes sont décrits dans une notice qui répertorie plus d'une centaine de séquences. Une fois le travail accompli, chaque technicien signe les procès-verbaux attestant de la réalisation des contrôles en précisant l'heure exacte, les outils employés, les mesures relevées... Le colis est positionné sur le wagon, puis solidement arrimé et recouvert de ses deux canopies<sup>2</sup>.

Un intervenant, chargé de la radioprotection pour EDF, réalise un contrôle ultime : il refait les analyses de surface, mesure le



Les étiquettes 7B et 7C mentionnent l'activité radiologique du colis et son indice de transport – 8,2, soit un débit de dose à 1m équivalent à 0,082 mSv/h – sont apposées sur l'emballage.

rayonnement gamma et neutronique, vérifie la conformité des étiquetages... À la hauteur du wagon, il mesure un débit d'équivalent de dose de 1 µSv/h : la zone doit être classée en zone surveillée<sup>3</sup>. Il fait intervenir deux techniciens, qui installent un balisage. À la fin de l'après-midi, les derniers documents ont été finalisés : tout est conforme. Avant que le wagon ne quitte le site, le chargé d'affaires d'EDF place à l'intérieur du convoi le dossier de transport. Puis il pose des scellés sur le chargement, à la jonction des canopies et sur les deux portes. Le responsable d'exploitation d'Orano TN cadenasse les deux portes. Le colis, sur son wagon, est prêt à partir pour l'usine de La Hague. ■

1. Société générale de surveillance, spécialisée dans le contrôle, la vérification, l'analyse et la certification.
2. Structures métalliques coulissantes destinées à recouvrir les emballages des matières radioactives.
3. Le débit de dose dans une zone surveillée – en dehors de la voie publique – est compris entre 0,5 et 7,5 µSv/h.



**DIAPORAMAS**  
Retrouvez tous les reportages!



**La radioactivité est mesurée par frottis**  
[www.irsn.fr/R39](http://www.irsn.fr/R39)





## Signalisation

Le responsable d'exploitation d'Orano TN installe et cadenasse sur le wagon des plaques métalliques informant de la nature du colis et signalant le risque.



## Lèchefrite

Sous le wagon, le responsable d'exploitation visse un bouchon, ferme une vanne, puis cadenasse un capot scellé sur la lèchefrite. Cette dernière est destinée à collecter l'eau qui pourrait ruisseler sur le chargement en fonction des conditions climatiques lors du trajet.



## Serrage des vis

L'agent technique combustibles-déchets d'EDF positionne les vis sur les capots amortisseurs de chocs de l'emballage à transporter. Il faut attendre une heure avant le serrage pour que la température des composants se stabilise. Chaque position de vis est numérotée, et le serrage doit être réalisé suivant un ordre et des dispositions précisément définis. L'IRSN a réalisé des tests pour déterminer la meilleure pratique.

Reportage photo © Laurent Zylbermann/Graphix-Images/Médiathèque IRSN



## Déshabillage

Chaque fois qu'ils passent de l'entrepôt au vestiaire, les techniciens ôtent gants, combinaison, surchaussures. Ils vérifient l'absence de contamination superficielle grâce à un polyradiamètre sur leurs mains, leurs pieds et leurs vêtements une fois les protections retirées.



## Mesure du colis

Un technicien en radioprotection mesure le débit d'équivalent de dose en plusieurs points à la surface du colis, qui n'excède pas 0,117 mSv/h. Une mesure qui est divisée par dix dès qu'on se trouve à deux mètres du wagon.



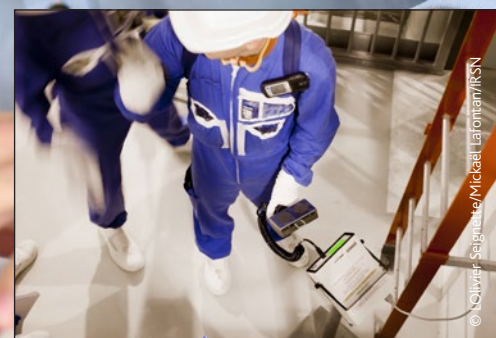


# Professionnels, découvrez nos formations en radioprotection

**Radiologue, médecin du travail, industriel, ingénieur en sûreté nucléaire ou en environnement...** vous êtes en contact avec des rayonnements ionisants ? L'IRSN vous propose un large catalogue de formations en radioprotection des personnes et de l'environnement.

Cette offre est gérée par l'ENSTTI<sup>1</sup>, qui délivre dans ce cadre des certifications de personnes compétentes en radioprotection. Rendez-vous sur <http://formation.irsnn.fr> pour accéder en quelques clics à l'ensemble des formations proposées.

1. European Nuclear Safety Training and Tutoring Institute



## Pour en savoir plus

Vous voulez programmer une formation ? Organiser une session sur mesure ? Vous avez des questions sur notre catalogue ?

**Contactez l'ENSTTI**

01 58 35 83 00 - [Contact@enstti.eu](mailto:Contact@enstti.eu)



Faire avancer la sûreté nucléaire