

# REPERES

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

Faire avancer la sûreté nucléaire

EN PRATIQUE

Quel suivi dosimétrique en cas de contamination interne ?

DOSSIER

## Démantèlement Avancer en toute sûreté

FAITS ET PERSPECTIVES

Explorer l'histoire des tempêtes pour mieux protéger les centrales







## Sûreté des réacteurs de recherche

Usages, risques, approches de sûreté, normes établies au niveau international... tels sont les thèmes relatifs aux réacteurs de recherche traités dans l'ouvrage de Jean Couturier, expert à l'Institut. Publié dans la collection « Sciences et techniques » de l'IRSN, il consacre un chapitre aux incidents et accidents survenus dans ces installations et aux retours d'expérience. Les améliorations réalisées après les réexamens de sûreté sont décrites.

[www.irsn.fr/livre-RR](http://www.irsn.fr/livre-RR)

## En vidéo : comprendre les événements en radioprotection

Que sont les événements significatifs en radioprotection (ESR) liés au fractionnement des doses ou à l'étalement

## Agenda

Du 15 au 20 septembre 2019  
Paris (Île-de-France)

### Conférence internationale sur la sûreté-criticité

Cette 11<sup>e</sup> édition, qui se tiendra à la Cité des sciences et de l'industrie, réunira les professionnels et étudiants ayant des activités liées à la sûreté-criticité. Organisé par l'IRSN, c'est l'occasion pour les experts et leurs pairs d'échanger sur l'état de l'art, les nouvelles connaissances et techniques. Présentations, posters, workshops et tours techniques sont au programme. Pour devenir sponsor ou réserver un stand : [icnc2019@irsn.fr](mailto:icnc2019@irsn.fr).

Plus d'informations : [www.icnc2019.com](http://www.icnc2019.com)

d'un traitement de radiothérapie ? Dans la version en ligne du numéro 40 du magazine *Repères*, une vidéo explique les causes de ces incidents. Elle présente des recommandations pour prévenir les risques associés à ces deux paramètres centraux dans les protocoles médicaux.

[www.irsn.fr/radiotherapie-videos](http://www.irsn.fr/radiotherapie-videos)



## L'hérédité au sommaire du nouveau Aktis

À lire dans le numéro 31 : l'hérédité et l'épigénétique dans les effets radio-induits, la caractérisation des aérosols issus de la découpe du corium par laser lors du démantèlement de Fukushima et l'endothélium vasculaire, une cible potentielle pour améliorer les traitements par radiothérapie. Éditée par l'IRSN, Aktis est une lettre d'information dédiée aux recherches menées par l'Institut.

[www.irsn.fr/aktis31](http://www.irsn.fr/aktis31)

Le 1<sup>er</sup> octobre 2019  
Lyon (Rhône-Alpes)

### Rencontre des PCR de Rhône-Alpes

Organisée par l'Association des personnes compétentes en radioprotection (APCRR), cette journée de formation et d'échanges rassemblera les PCR de la région Rhône-Alpes. Elle portera sur l'actualité en radioprotection. Des représentants des laboratoires de dosimétrie de l'IRSN seront présents pour proposer aux PCR une prestation de suivi dosimétrique des travailleurs.

Plus d'informations : [www.pcr-rhonealpes.fr](http://www.pcr-rhonealpes.fr)

# Online WEBMAG

[www.irsn.fr/R42](http://www.irsn.fr/R42)



Temps fort

## Comment le logiciel Miodose optimise-t-il la surveillance des travailleurs ?



Faits et perspectives

## Tempêtes : comment les données publiques sont-elles mises à disposition ?



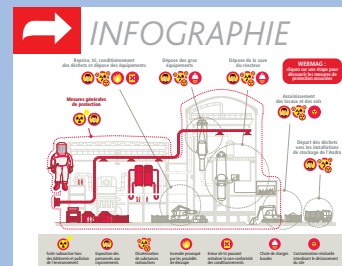
Reportage : Radiopharmacie  
**La radioprotection des professionnels**

**Des consignes claires et des contrôles fréquents**

## Abonnement

**POUR VOUS ABONNER :**  
[www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)

Rubrique l'IRSN > Publications  
> Magazine Repères



Dossier

## Démantèlement : maîtriser les risques



Dossier

## Silo 130 de La Hague : trier les déchets sans attendre



Dossier

## Co-activité : comment appréhender les risques ?



Dossier

## Caractériser la pollution des sols

# Sommaire

En couverture : Dans la caverne des auxiliaires nucléaires de Chooz A (Ardennes), Xavier Masseau, expert IRSN (à gauche), et le directeur de la centrale devant les sas de confinement lors du démantèlement des casemates.

## P.4 TEMPS FORTS

Radioprotection

**Un nouveau logiciel optimise la surveillance des travailleurs**

Aléas sismiques

**L'archéosismologie : un outil d'aide à la sûreté**



## P.6 FAITS ET PERSPECTIVES

Centrales

**Explorer l'histoire des tempêtes pour renforcer la protection des sites**

## P.9 ZOOM

**Au cœur des vaisseaux**

## DOSSIER P.10

Dossier du prochain n° :

**Dispersion de l'iode radioactif : mieux protéger les populations**



# Démantèlement

## Avancer en toute sûreté

## P.17 EN PRATIQUE

Contamination interne des travailleurs

**Quel suivi dosimétrique ?**

## P.20 INTÉRÊT PUBLIC

**Les lycéens découvrent la radioprotection**



## P.22 REPORTAGE

Radiopharmacie

**Préparer des médicaments avec rigueur et précaution**

© Philippe Durieux/Médiaséquence IRSN



# Démantèlement

## Un défi pour aujourd'hui et demain

En France et dans le monde, le démantèlement des installations nucléaires implique de dégager des moyens techniques, humains et financiers; de mettre en place les opérations dans les meilleures conditions de sûreté et de radioprotection; de gérer les volumes de déchets radioactifs. Une organisation adaptée, différente de l'exploitation, est nécessaire dans un contexte de sous-traitance et de co-activité. Le démantèlement doit être anticipé pour maîtriser les risques pour l'homme et l'environnement. Les facteurs organisationnels et humains présentent un enjeu particulier car la configuration des installations – et donc les risques – évolue en permanence. Depuis une dizaine d'années, l'IRSN développe son expertise grâce à des recherches et aux retours d'expérience. L'analyse des approches de sûreté des exploitants est conduite de façon globale pour l'ensemble des installations d'un même distributeur, et spécifique pour chacune des installations arrêtées. Le dossier de ce numéro 42 décrit cette mission, riche et complexe.

**Marc Pultier**

Chef du service référent en démantèlement

REPÈRES – Éditeur : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - Membre d'ETSON – 31, avenue de la Division-Leclerc, 92260 Fontenay-aux-Roses – Tél. : 01 58 35 88 88 – Site Internet : [www.irsn.fr](http://www.irsn.fr) – Courriel : [reperes@irsn.fr](mailto: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 : 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 : © S. Brändström/Signatures/IRSN et © M.-L. Gobin/BEP/Sud-Ouest/MaxPPP – Impression : Handiprint (50) – Imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement – ISSN : 2103-3811 et 2491-8776 (Web) – juin 2019.

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



## Débat public

### Gestion des déchets radioactifs

Entreposage de combustibles usés, impact des déchets radioactifs sur l'homme et l'environnement, alternatives au stockage géologique... voilà quelques thèmes abordés lors du débat sur le plan national (PN) de gestion (G) des matières et des déchets radioactifs (MDR) qui se tient jusqu'au 25 septembre. Pour la première fois, le public est invité à poser ses questions et exprimer ses préoccupations – d'ordres technique, économique, sociologique et éthique – en vue de la préparation du prochain plan. Des experts en gestion des déchets, sûreté, radioprotection et ouverture à la société prennent part à la concertation avec des interventions lors de réunions publiques, des ateliers avec des étudiants, un jeu de plateau... Pour alimenter le débat, l'Institut a réalisé deux expertises<sup>1</sup>. L'une concerne les possibilités d'entreposage à sec des combustibles usés, l'autre dresse un panorama des recherches menées à l'international sur les alternatives au stockage géologique.

1. [www.irs.fr/PNGMDR\\_150519](http://www.irs.fr/PNGMDR_150519)

**WWW** Pour en savoir plus : [www.irs.fr/dechets](http://www.irs.fr/dechets)

# 70

C'est le nombre d'avis rendus par l'Institut entre 2016 et 2018 concernant des installations en cours de démantèlement, des chantiers de démantèlement ou des opérations de reprise de déchets anciens.

# 3

Les experts ont analysé les stratégies de démantèlement de trois exploitants – Orano, EDF et le CEA.

Retrouvez notre dossier *Démantèlement* en page 10.

## Santé



Médecin du travail accueillant une patiente pour procéder à son suivi dosimétrique.

© Laurent Zylberman/Graphix-Images/Médiathèque IRSN

## Radioprotection

### Un nouveau logiciel optimise la surveillance des travailleurs

« **M**iodose est plus simple et intuitif à utiliser que notre outil d'investigation actuel », explique Anne-Laure Agrinier, médecin du travail au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). Lors des surveillances de routine ou en cas d'incident de contamination radioactive, il est nécessaire d'obtenir une estimation précise de la dose reçue par les travailleurs exposés. Partant de ce constat, Estelle Davesne, spécialiste en dosimétrie interne à l'IRSN, a développé le logiciel Miodose en partenariat avec Orano. « *Le mode de contamination, la nature des composés radioactifs auxquels la personne a été exposée ou l'effet d'un éventuel traitement chélateur<sup>1</sup> sont mieux pris en compte par l'outil.* »

À la différence du logiciel utilisé jusqu'alors, Miodose est disponible en français. Cette

spécificité simplifie sa prise en main par les médecins du travail. Testé depuis le début de l'année sur le site du CEA de Marcoule (Gard), le logiciel a fait la preuve de sa fiabilité en cas de contamination interne. « *Il facilite la saisie des mesures directes obtenues par anthroporadiométrie<sup>2</sup> ou dosages d'excreta, des valeurs indispensables pour déterminer la dose totale de radionucléides reçue par un travailleur* », témoigne Anne-Laure Agrinier.

Une fois l'ensemble des données disponibles renseignées dans le logiciel, un rapport complet peut être édité puis archivé dans le dossier médical du travailleur. « *C'est un gage de traçabilité supplémentaire* », conclut-elle. La commercialisation de Miodose sous licence d'autorisation devrait démarrer en septembre.

1. Traitement médical destiné à faciliter l'élimination de radionucléides de l'organisme par formation d'un complexe entre l'agent chélateur administré et le radionucléide ciblé.
2. Technique par laquelle les rayonnements ionisants émis par la thyroïde ou le corps entier sont mesurés.

## VIDÉO



Comment le logiciel Miodose optimise-t-il la surveillance des travailleurs ?

[www.irs.fr/R42](http://www.irs.fr/R42)

**WWW** Pour en savoir plus : [estelle.davesne@irs.fr](mailto:estelle.davesne@irs.fr)



Sûreté



Des repères rouges sont utilisés pour étudier les propriétés mécaniques des matériaux de l'église Sant'Agata del Mugello (Italie).

© LMAPS/IRSN

“L'archéosismologie tire du passé des enseignements utiles pour le futur.”

Aléas sismiques

L'archéosismologie : un outil d'aide à la sûreté

L'église de Sant'Agata del Mugello, près de Florence, en Italie, est le chantier d'étude d'une thèse de doctorat en archéosismologie. Cette approche interdisciplinaire consiste à analyser les traces des séismes anciens sur les bâtiments historiques. Elle apporte des connaissances sur les risques sismiques qui améliorent l'expertise de la sûreté des installations nucléaires.

Pourquoi cette église ? Parce qu'elle a connu plusieurs secousses, comme celles de 1542 et 1611, et que les dommages et réparations ont été bien documentés, puis validés par des analyses archéologiques. L'objectif de cette thèse, démarrée en 2017 et co-encadrée par l'IRSN et l'École

normale supérieure (ENS), est de développer une méthodologie innovante pour mieux connaître les tremblements de terre passés. « *Le comportement de l'édifice lors de sollicitations sismiques sera étudié avec des outils numériques visant à reproduire les dommages documentés* », précise Julien Clément, ingénieur en génie civil des structures à l'Institut.

Ce travail nécessite de fortes interactions entre sismologues, archéologues et spécialistes du génie civil.

WWW Pour en savoir plus : [julien.clement@irsn.fr](mailto:julien.clement@irsn.fr)

Recherche



Colonie de daphnies, des microcrustacés invertébrés.

© Visuale Unlimited/BSIP

Effets des faibles doses  
Transmission génétique  
ou épigénétique ?

Chez des invertébrés exposés à des doses de rayonnements faibles à modérées<sup>1</sup>, une transmission des effets radio-induits a été observée sur plusieurs générations.

Ce phénomène est-il lié à un processus génétique ou épigénétique<sup>2</sup> ? L'Institut mène des recherches pour comprendre les mécanismes mis en jeu. Des altérations de la séquence d'ADN entraînant des variations de l'information génétique ont déjà été décrites. Mais d'autres mécanismes pourraient être impliqués.

Des modifications de la méthylation de l'ADN – processus épigénétique n'affectant pas la séquence – ont été mises en évidence chez des grenouilles et des pins sylvestres

dans les zones contaminées de Tchernobyl et Fukushima. Une étude menée sur des crustacés invertébrés – les daphnies – a montré pour la première fois que de telles évolutions observées sur la génération exposée se transmettent sur plusieurs générations. Ces résultats, obtenus par Marie Trijau au cours de sa thèse au Laboratoire d'écotoxicologie des radionucléides (Leco), contribuent à la compréhension des effets des faibles doses.

1. De quelques  $\mu\text{Gy/h}$  à quelques dizaines de  $\text{mGy/h}$ .
2. Un processus épigénétique change l'expression des gènes sans impliquer de modification de l'ADN alors qu'un processus génétique en remanie la séquence.

WWW Pour en savoir plus : [www.irsn.fr/aktis31](http://www.irsn.fr/aktis31)

Incidents nucléaires

Partager les expériences internationales

Le système de notification international AIEA-IRS<sup>1</sup> recense les incidents survenus dans les réacteurs nucléaires. Vincent Crutel, expert à l'IRSN et correspondant pour ce système, l'illustre avec un exemple. « *En 2018, le blocage des manchettes thermiques des grappes de contrôle d'un réacteur a conduit à des actions correctives sur l'ensemble du parc français, répertoriées dans la base. Des scientifiques japonais m'ont demandé des précisions sur l'incident pour savoir si leurs installations pouvaient être concernées.* »

Le dispositif recense 4 336 événements codés selon l'origine de leurs défaillances et documentés avec les enseignements à tirer. L'IRSN est coordinateur de la base pour la France, et Vincent Crutel est chargé de délivrer les autorisations d'accès aux autorités de sûreté, experts, exploitants, fabricants et chercheurs. Mis en place en 1980, le système compte trente-trois pays participants.

1. Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) – International Reporting System for Operating Experience (IRS).

WWW Pour en savoir plus : [www.iaea.org/fr/ressources/bases-de-donnees/les-systemes-de-notification-des-incidents-pour-les-installations-nucleaires](http://www.iaea.org/fr/ressources/bases-de-donnees/les-systemes-de-notification-des-incidents-pour-les-installations-nucleaires)  
Contact : [vincent.crutel@irsn.fr](mailto:vincent.crutel@irsn.fr)



## FAITS ET PERSPECTIVES



Submersion de la digue nord de Wimereux (Pas-de-Calais) qui avait cédé lors du passage de la tempête Eleanor en 2018.

© Johan Ben Azouz/La Voix du Nord/MaxPPP



Les abords de la centrale du Blayais (Gironde) inondés à la suite de la tempête Martin de décembre 1999.

© Méire-Laure Gobin/BEP/Sud-Ouest/MaxPPP

### Centrales nucléaires

# Explorer l'histoire des tempêtes pour renforcer la protection des sites

Pour les centrales implantées sur le littoral, la connaissance des phénomènes météorologiques extrêmes est une composante majeure de la gestion des risques. Des scientifiques mènent des recherches sur les données historiques afin d'affiner la prévision des aléas naturels. Des travaux pris en compte lors des récentes visites décennales des réacteurs de 900 MWe.

**E**n 2010, Xynthia s'abat sur l'ouest de la France. De l'Aquitaine à la Normandie, des vents violents et de fortes marées provoquent une importante élévation du niveau de la mer. Des zones côtières sont submergées et les conséquences sont dramatiques : 59 morts et des dégâts matériels considérables. Si l'événement n'affecte pas les centrales, il rappelle l'importance d'entourer les installations littorales d'une protection adéquate en cas de phénomène naturel extrême. Car l'inondation des côtes – la submersion – est un risque majeur pour les centrales situées en bord de mer : Penly et Paluel (Seine-Maritime), Flamanville (Manche), Gravelines (Nord) et Le Blayais (Gironde).

La submersion est la conséquence d'une élévation du niveau de l'eau, elle-même provo-

quée par l'effet des dépressions ou des tsunamis qui déferlent sur le littoral et se cumulent avec les phénomènes de marées : de fortes houles et variations de pression atmosphérique, parfois amplifiées par la topographie du territoire, engendrent une montée des eaux. S'ensuit un cortège de risques : inondations, crues de fleuves, ruptures de berges... Les chercheurs de l'IRSN décryptent les aléas météorologiques extrêmes pour prévenir les risques et protéger les installations.

### La surcote à travers l'histoire

Les centrales de bord de mer ont fait l'objet, dès leur conception, d'une attention particulière : installées sur des plateformes surélevées, elles sont entourées de digues édifiées en front de mer et autour des sites. Le nombre, l'emplacement et la hauteur de ces ouvrages,

de même que les murs des installations, sont fonction d'une valeur clé : la surcote, ou différence entre les hauteurs d'eau prédites et observées. Or, le protocole de calcul en vigueur depuis 1984 a été remis en question en 1999, après la tempête Martin. Associée à une forte marée et des conditions exceptionnelles de houle et de pression atmosphérique, elle a submergé une partie de la centrale du Blayais, induisant l'affaiblissement du niveau de sûreté de deux des quatre réacteurs<sup>1</sup>. « Nous étions proches de la surcote millénale, qui a une chance sur mille de se produire chaque année, souligne Claire-Marie Duluc, chercheuse au Bureau d'expertise hydrogéologique et sur les risques d'inondation et géotechniques (Behrig) à l'IRSN. Nous avons compris que le modèle statistique utilisé jusqu'alors pour calculer les surcotes n'était pas adapté. »





Remise en état de la digue de la centrale du Blayais (Gironde), désormais placée sous haute surveillance.

L'Institut développe, en parallèle de l'exploitant, ses propres calculs pour déterminer le degré de protection des centrales. Des données historiques sont prises en compte en plus de celles sur le niveau marin fournies par les marégraphes – instruments mesurant la hauteur de la mer – du Service hydrographique et océanographique de la Marine (Shom). En 2015, les chercheurs du Behring ont estimé les niveaux marins extrêmes à La Rochelle (Charente-Maritime) à partir de données des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles. « *Intégrer des informations historiques aux études statistiques ouvre la possibilité de prendre en compte davantage d'événements exceptionnels, donc d'améliorer leur représentativité dans l'échantillon des valeurs extrêmes* », précise Yasser Hamdi, chercheur en hydrologie et statistique.

Lorsqu'ils vérifient que les dispositions retenues sont suffisantes pour protéger les installations, les chercheurs gagnent en robustesse et en fiabilité. Pour améliorer la solidité statistique, le contexte régional est pris en compte. Nathalie Giloy, chercheuse en environnement littoral, complète : « *Nous veillons à recueillir des données antérieures à l'installation des marégraphes dans les années 1950.* » Pour la centrale de Gravelines, elle a fouillé dans l'histoire hydrométéorologique de Dunkerque (voir infographie), conduisant à une réévaluation de la surcote extrême.

## Des informations historiques sur 784 tempêtes

Après de nombreux échanges, l'IRSN et EDF se sont accordés sur un nouveau mode de calcul des surcotes extrêmes qui tient compte du degré de fiabilité des sources historiques exploitées. Cette méthodologie a été utilisée à l'occasion du réexamen de sûreté des quatrièmes visites décennales des réacteurs de 900 MWe, dont les conclusions de l'Institut ont été rendues en février.

Au fil de ses recherches, Nathalie Giloy a amassé des informations sur 784 événements. Elle les a intégrées dans une base de données, « *Tempêtes et submersions historiques* », accessible à tous (voir la vidéo accessible dans la version webmag *via* le lien page suivante). Un groupe de travail a été créé pour mutualiser ces données et les analyser. Il est composé de représentants du Shom, du

## PROCESS

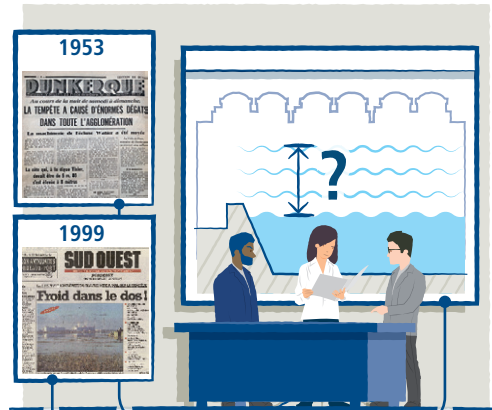
### Gravelines : une recherche historique pour actualiser la sûreté de la centrale

Une enquête multidisciplinaire sur les tempêtes survenues dans le passé dans la région de Dunkerque conduit à réévaluer la protection de la centrale de Gravelines (Nord).

#### 1 Retours d'expériences

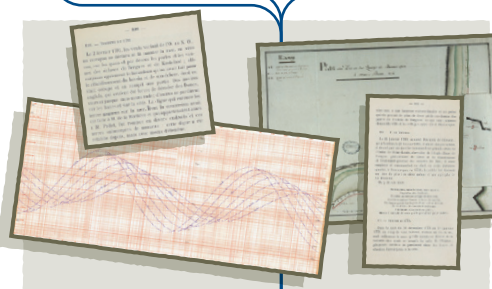
En 1953, une tempête touche le littoral de Dunkerque (Nord). En 1999, la tempête Martin inonde la centrale du Blayais (Gironde). Ces événements obligent à mieux **déterminer les surcotes extrêmes** et à changer de méthode pour les installations classées « *noyau dur* » comme la centrale de Gravelines. Il faut réévaluer les **risques** en retraçant **l'histoire des tempêtes**.

<sup>1</sup> Concept post-Fukushima visant à vérifier l'existence de structures et équipements de sûreté résistants aux événements extrêmes.



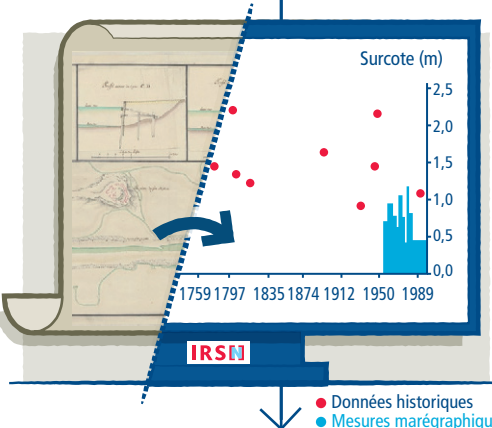
#### 2 Une investigation méticuleuse

Appuyés par un **historien des risques naturels**, les **hydrologues** de l'IRSN passent au peigne fin journaux et témoignages anciens, archives municipales, thèses, photographies... Toutes les tempêtes et submersions dans la région de Dunkerque depuis 1500 – près de 80 événements – sont intégrés dans une **base de données** et analysés.



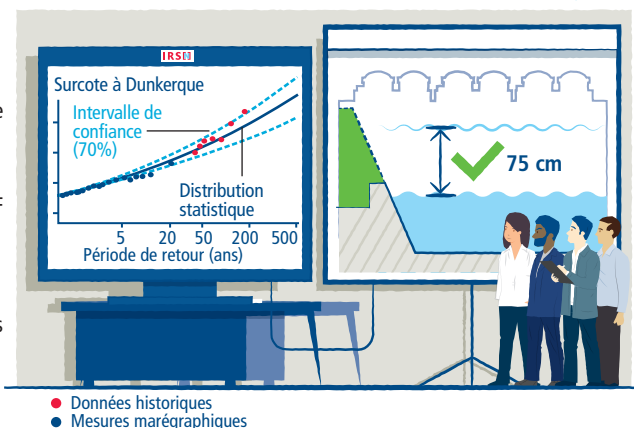
#### 3 Reconstruction des surcotes historiques

Pour passer d'une donnée qualitative à quantitative, il faut reconstruire le **niveau marin maximum** atteint lors d'un événement, puis transposer cette donnée dans les références altimétriques actuelles. Des informations sont apportées par les **océanographes, météorologues, géographes, urbanistes...** Les experts de l'IRSN reconstruisent une **surcote** correspondant à la différence entre le niveau marin observé et prédit.



#### 4 Calcul de la surcote millénaire

Une **surcote millénaire** – ayant une chance sur mille de se produire chaque année – est déterminée. Les études des **statisticiens** de l'Institut et d'EDF conduisent à **augmenter de 75 cm la surcote millénaire** à retenir pour Gravelines. L'exploitant étudie de nouvelles digues pour le risque de submersion.







Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), du Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), d'EDE, du bureau d'études d'ingénierie Artelia et d'un historien.

En mars 2019, lors des Journées Refmar<sup>2</sup>, grand rendez-vous des spécialistes de l'observation du niveau de la mer, Nathalie Giloy a présenté les nouvelles productions du groupe : des fiches tempêtes, qui détaillent la reconstruction de niveaux marins historiques réalisée en différentes localisations. Ces fiches améliorent la connaissance des humeurs du ciel et de la mer et, *in fine*, renforcent la sûreté nucléaire. ■

1. « Inondations à la centrale du Blayais suite à la tempête de 1999 », Repères n° 26, [www.irsn.fr/R26](http://www.irsn.fr/R26)
2. Refmar : réseau de référence des observations marégraphiques.

**VIDÉO**

**Tempêtes : comment les données publiques sont-elles mises à disposition ?**  
[www.irsn.fr/R42](http://www.irsn.fr/R42)

**WWW** Pour en savoir plus :  
 Pour consulter la base de données « Tempêtes et submersions historiques », télécharger l'application après demande d'adhésion : [www.irsn.fr/bdts](http://www.irsn.fr/bdts)  
 Guide ASN, « Protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes », [www.asn.fr/Reglementer/Guides-de-l-ASN](http://www.asn.fr/Reglementer/Guides-de-l-ASN)  
 Rapport IRSN sur L'aléa inondation, [www.irsn.fr/alea-inondation](http://www.irsn.fr/alea-inondation)

## Pourquoi avez-vous participé au groupe de travail « Tempêtes et submersions historiques » ?

L'observation des événements passés est essentielle pour appréhender l'évolution des tempêtes. Ces dernières années, les échanges entre institutions et industriels se sont renforcés. En participant à ce groupe de travail, nous mutualisons les données. Nous effectuons une tâche de bénédictins, à chercher, digitaliser et contrôler les observations du passé : autant en faire profiter la communauté.

## Quel est votre apport ?

Une vision transversale. Nous maîtrisons les instruments, méthodes d'observation – de l'œil nu aux capteurs numériques – et protocoles de calcul utilisés pour les prédictions de marées au fil des siècles. Pour reconstruire des séries marégraphiques, nous récoltons des informations utiles sur le passé. À Brest (Finistère) par exemple, nous avons compris que l'évolution du niveau de la mer n'est pas constante car elle est affectée par des variations interannuelles.

## Quels enseignements tirez-vous de ces travaux ?

Nous étudions le niveau de la mer, et le groupe de travail s'occupe des tempêtes. Nous amassons des données complémentaires qui améliorent nos outils statistiques comme « Niveaux marins extrêmes ». Nous en tirons des périodes de retour, c'est-à-dire le temps statistique entre deux événements connaissant des hauteurs d'eau similaires.

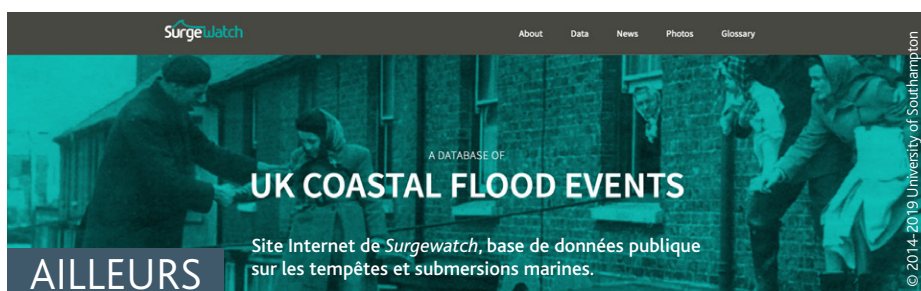


© N. Pouvreau

## 3 questions à...

Nicolas Pouvreau

Expert en niveau de la mer au Shom



© 2014-2019 University of Southampton

## Quatre zones littorales exposées sont identifiées au Royaume-Uni

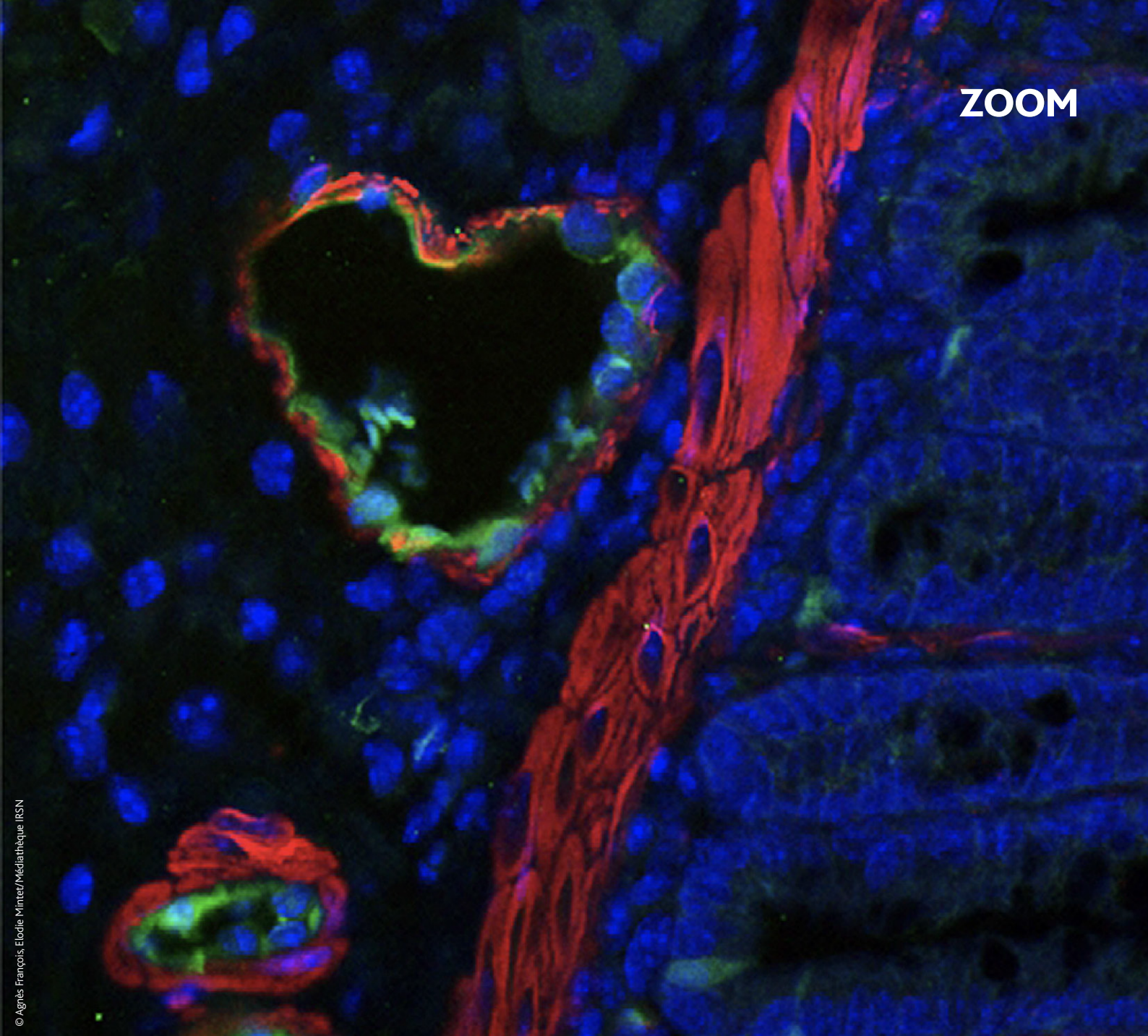
Outre-Manche, la submersion représente un risque majeur pour la population et les infrastructures. Le registre national des risques<sup>1</sup> le place en deuxième position derrière la pandémie. Pourtant, « peu de données sont disponibles sur le sujet, en particulier les événements anciens, et les inondations ne sont pas systématiquement documentées », explique Ivan Haigh, chercheur au Centre d'océanographie national de l'Université de Southampton. En 2015 au Royaume-Uni, il crée Surgewatch, une base de données publique sur les tempêtes et submersions marines. Elle documente le nombre de personnes touchées, d'animaux morts, de

maisons et infrastructures détruites... Les informations sont issues de recherches bibliographiques, visites sur le terrain et témoignages. « D'abord, nous nous sommes intéressés aux événements depuis 1915. Désormais, nous remontons deux mille ans en arrière ! » Ces travaux ont permis d'identifier quatre zones littorales particulièrement exposées et les types de tempêtes les plus dommageables. Surgewatch contribue à la définition des actions de prévention des risques côtiers par les autorités britanniques.

1. National Risks Register of Civil Emergencies.

**WWW** Pour en savoir plus : [www.surgewatch.org](http://www.surgewatch.org)





## Au cœur des vaisseaux

Ce tableau aux accents psychédéliques n'est pas l'œuvre d'un artiste contemporain de renom. Il s'agit de l'observation au microscope – grossissement x400 – d'une section de rectum de souris préalablement irradié.

Chaque couleur, obtenue par marquage fluorescent, correspond à une structure biologique particulière : rouge pour le mésenchyme et la paroi des vaisseaux sanguins, vert pour leur endothélium<sup>1</sup> et bleu pour les noyaux des différentes cellules de l'échantillon tissulaire. Les rares taches jaunes résultent de la superposition des fluorescences rouges

et vertes. Elles attestent de la transformation progressive de certaines cellules endothéliales en cellules du mésenchyme à la suite de l'irradiation.

Cette image témoigne des effets des rayonnements ionisants sur les tissus sains chez l'animal. Elle aide à comprendre le rôle du réseau vasculaire dans l'apparition tardive de certaines lésions et à mieux appréhender le rapport bénéfice/risque de la radiothérapie pelvienne. Alors que l'efficacité de cette méthode pour soigner les cancers s'est améliorée ces dernières années, des

### Agnès François

Chercheuse en radiobiologie et radiopathologie

séquelles post-thérapeutiques peuvent survenir quinze à vingt ans après la fin du traitement. C'est le cas de la fibrose digestive. Les chercheurs du Laboratoire de radiobiologie des expositions médicales (LRMed) de l'IRSN, à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine), tentent d'identifier les mécanismes cellulaires et moléculaires impliqués afin de prévenir sa formation. ■

<sup>1</sup>. Au niveau d'un vaisseau sanguin, le mésenchyme correspond à l'ensemble des cellules assurant sa structure et l'endothélium forme la couche de cellules au contact du sang.





Xavier Masseau, expert IRSN (à gauche), devant un sas de confinement lors du démantèlement de Chooz A (Ardennes).

# 55

installations démantelées ou en cours de démantèlement en France : réacteurs de puissance, usines du cycle de production du combustible, installations de recherche...



# Démantèlement

## Avancer en toute sûreté

Pour les installations nucléaires en démantèlement, les niveaux de difficulté, de risque ou d'urgence sont variables. En rendant son avis sur la stratégie globale des exploitants, puis sur les solutions techniques proposées pour chaque opération, l'IRSN veille à ce que celles-ci puissent être menées dans les meilleures conditions de sûreté et de radioprotection.



© Laurent Zyberman/Graphix Images/Médiathèque IRSN

Le grand oral a duré deux jours. Il s'est tenu les 27 et 28 juin 2018, au siège de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) à Montrouge (Hauts-de-Seine). L'Institut a rendu son avis sur la nouvelle stratégie de démantèlement des installations et de gestion des déchets du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) devant deux groupes permanents d'experts (GPE)<sup>1</sup>. Une trentaine d'ingénieurs de spécialités variées – démantèlement, transport de déchets et de combustibles, facteurs humains et organisationnels... – ont instruit ce dossier. La quasi-totalité de leurs conclusions a été reprise par les GPE.

L'examen des trois stratégies générales de démantèlement des principaux exploitants – EDF, le CEA et Orano – est la première phase de l'expertise de l'Institut pour vérifier que les étapes pourront être réalisées dans un délai acceptable, en maîtrisant les risques liés à la radioactivité. Chaque stratégie générale dresse, par ordre de priorité en termes de sûreté, la liste des opérations. Elle recense les moyens disponibles ou à créer : unités de traitement de déchets, capacités d'entreposage, emballages et transport, sites de stockage...

### Cadarache et Saclay en priorité

L'instruction d'un tel dossier court sur près de deux ans. Les experts vérifient les choix de l'exploitant. Ils formulent des demandes de compléments d'informations et suggestions. L'exploitant peut en prendre acte sous la forme d'engagements. Les désaccords font l'objet, en fin d'examen, de recommandations de l'IRSN soumises à l'ASN.

« Les vingt-deux installations nucléaires de base (INB) à démanteler sont variées : réacteurs expérimentaux, installations d'entreposage de déchets... Cela empêche la standardisation des modes opératoires, remarque Stanislas Massieux, expert en démantèlement. Nous avons accordé une grande attention à la hiérarchie des priorités en allant jusqu'à développer une méthodologie pour comparer objectivement les risques. » C'est l'un des principaux acquis de l'expertise.

### Tchernobyl Isoler les transuraniens

À la demande de la Commission européenne, l'IRSN a étudié la création d'une installation de prétraitement des eaux d'infiltration collectées dans le sarcophage du réacteur n° 4 de la centrale de Tchernobyl. Il faut en effet décomposer les matières organiques dont les eaux se sont chargées et isoler les radioéléments à vie longue – les transuraniens.

Or, le dossier de l'exploitant ukrainien ne renseigne pas suffisamment sur la nature des produits organiques, ni sur celle des sous-produits résultant de leur traitement et susceptibles d'occasionner des risques d'explosion. Dans son avis de mars 2017, l'Institut a recommandé de porter une attention à ces risques.

Des déchets radioactifs sont entreposés en containers à la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux (Loir-et-Cher).

Ils sont en attente d'acceptation par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).

1. Celui pour les laboratoires et usines et celui pour les déchets. Les GPE sont spécialisés et comptent une trentaine de membres chacun. Ils sont nommés par l'ASN pour une durée de quatre ans.

www Pour en savoir plus :  
patrice.francois@irsn.fr  
denix.depauw@irsn.fr





Stanislas Massieux et Diane Crozes-Madec, experts à l'Institut, préparent le rapport sur la stratégie de démantèlement des installations du CEA.

© Philippe Dureau/Médiathèque IRSN



Entreposage des déchets de faible et moyenne activité à vie courte dans la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux (Loir-et-Cher).

© Laurent Zyberman/Graphix-Images/Médiathèque IRSN

## “ Nous avons soulevé le risque d’engorgement de certaines installations de traitement des déchets. ”

La méthode repose sur une grille de critères portant sur la quantité et l’activité des éléments radioactifs, l’état des contenants et des constructions, les conséquences d’une agression – séisme ou incendie –, le risque de migration dans les sols... Ces critères sont agrégés pour classer les opérations. La méthode a permis de confirmer de nombreuses priorités retenues par le CEA. Elle a également conduit l’exploitant à en identifier d’autres et à modifier sa stratégie. En tête de liste figure désormais la gestion des déchets moyennement irradiants – 3 000 TBq – entreposés dans d’anciennes fosses du site de Cadarache (Bouches-du-Rhône). La priorité porte aussi sur les déchets et morceaux de combustibles – 4 400 TBq – entreposés dans l’INB 72 de Saclay (Essonne), un centre d’entreposage en milieu périurbain.

« Cette méthode a été mise au point grâce au dialogue avec les experts, indique Vincent Gorgues, maître d’ouvrage assainissement-démantèlement au Commissariat. Nous avons convergé sur la nécessité de renforcer notre chaîne pour la prise en charge des déchets, avec de gros chantiers à venir. »

### Faire sauter le verrou des déchets

En plus d’être pertinente, une bonne stratégie de démantèlement doit être robuste pour ne pas être à la merci du premier aléa. « La principale fragilité de la stratégie du CEA tient à la mutualisation de ses installations de traitement et de conditionnement des déchets », explique Diane Crozes-Madec,

# 120

points soulevés par les experts de l’IRSN lors de l’examen de la stratégie de démantèlement et de gestion des déchets du CEA.

### À LIRE



Silo 130 de La Hague : trier les déchets sans attendre

[www.irsn.fr/R42](http://www.irsn.fr/R42)

## Découpe thermique Éviter la dégradation des filtres

Comment éviter que les particules incandescentes produites lors de la découpe d’équipements ne dégradent les filtres de la ventilation et n’augmentent le risque de fuite d’aérosols radioactifs dans l’environnement ? Dans le cadre d’un partenariat avec EDF, les chercheurs de l’Institut se sont dotés d’un banc d’essai, Capimif<sup>1</sup>, qui reproduit des opérations de découpe à la disqueuse ou à la torche à plasma. Lors d’une thèse universitaire<sup>2</sup>, ce banc a permis de caractériser les particules incandescentes émises et de mesurer leur impact sur l’efficacité des filtres. Plusieurs campagnes d’essais portant sur deux types de pare-étincelles pouvant faire écran – en chicane ou à treillis métallique – ont ensuite été menées. Grâce à elles, les matériels ne répondant pas aux exigences seront identifiés et les critères à respecter par les sous-traitants d’EDF définis. Capimif a été retenu par le gouvernement japonais pour caractériser les particules issues de la découpe de simulants du corium<sup>3</sup> pour améliorer la sûreté du démantèlement de la centrale de Fukushima.

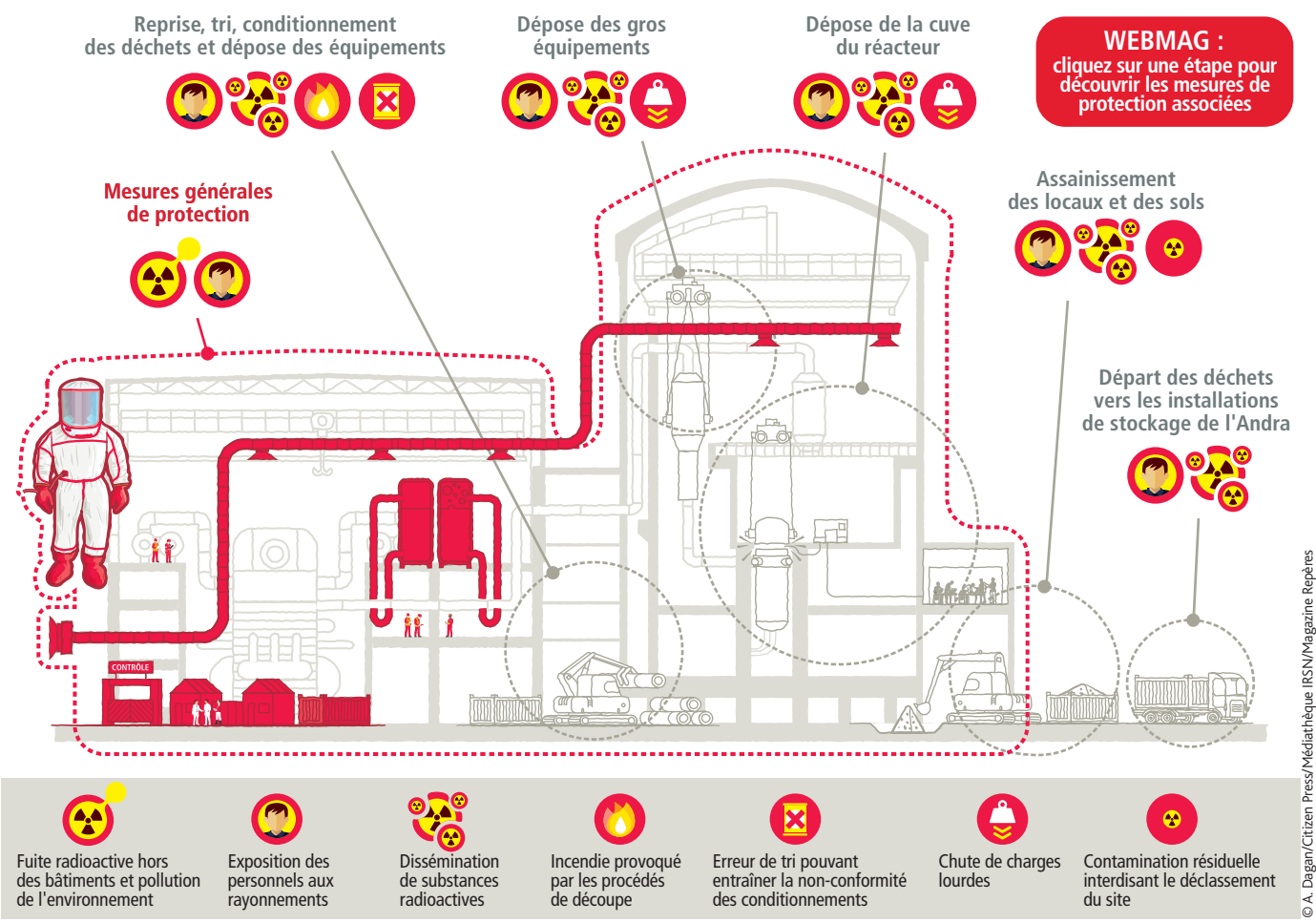
1. Caractérisation des particules incandescentes et mesure de l’impact sur filtre (Capimif).
2. Caractérisation et impact des particules incandescentes dans les réseaux de ventilation lors d’opérations de démantèlement, Pierre Marchal, INSA de Rouen, 2014.
3. Magma radioactif issu de la fonte du cœur d’un réacteur.



## EN CLAIR

## Démantèlement : maîtriser les risques

Démanteler une installation, c'est supprimer les barrières qui protégeaient les travailleurs, le public et l'environnement de la radioactivité. Après l'évacuation des combustibles qui suit la mise à l'arrêt, les risques évoluent. Chaque étape exige des précautions particulières.



qui a piloté pour l'IRSN cette partie du dossier. Pour la première fois, les autorités de sûreté ont demandé à l'exploitant de réunir dans un même dossier ses activités civiles et de défense, y compris en termes de démantèlement d'installations et de gestion de déchets. « Avec cette vue d'ensemble, nous avons soulevé le risque d'engorgement de certaines installations de traitement de déchets et évalué les conséquences d'une indisponibilité temporaire. » Dans son avis, l'Institut pointe les incertitudes qui pèsent sur l'unité qui reçoit, sur le site de Cadarache, la quasi-totalité des déchets solides de moyenne activité à vie longue. Sa presse hydraulique doit être arrêtée pour rénovation pour une durée d'un an. Toute prolongation décalerait mécaniquement plusieurs chantiers prévus à court terme.

Le CEA s'est engagé à transmettre tous les deux ans une synthèse faisant état de la charge prévisionnelle de toutes ses installations de gestion de déchets.



Dans leur avis, les experts ont émis des recommandations sur les déchets de très haute activité. L'autorisation de l'emballage utilisé pour transporter les combustibles irradiés de l'installation Phénix expirant fin 2018, une solution de rechange a été identifiée. L'intérêt d'utiliser des unités de traitement des effluents liquides de l'usine Orano de La Hague (Manche) n'a pas encore été démontré. La création de dispositifs alternatifs est à envisager. « Ces incertitudes nous poussent à accélérer la création d'entrepôts tampons », confirme Vincent Gorgues.

## Du dossier au terrain

Aussi convaincante puisse-t-elle être sur le papier, la réussite d'une stratégie de démantèlement se joue sur le terrain, dans une succession de chantiers dont la sûreté et la radioprotection doivent être assurées. Les experts s'y intéressent, comme ils l'ont fait pour l'INB 72 de Saclay. À la suite d'un



précédent avis, ils attendaient l'analyse d'un dispositif capable d'extraire 143 fûts – contenant déchets et morceaux de combustibles irradiés – des puits en béton dans lesquels ils sont enfermés depuis des décennies. Le dispositif trie ensuite leur contenu, qui est reconditionné avant envoi vers un exutoire adapté.

« La composante neutronique n'avait pas été prise en compte pour le dimensionnement des hublots de la cellule de tri », se souvient Pascal Le Van Vang, spécialiste en radioprotection. Il a passé au crible les mesures de protection des travailleurs. « J'ai revu le calcul des débits de dose en tenant compte du cobalt 60. Il est peu présent mais dispose de rayonnements photoniques très énergétiques », poursuit-il. Les résultats étaient jusqu'à 30 fois supérieurs à ceux calculés par le CEA : « Cela ne remet pas en cause les valeurs limites, mais il était possible de faire mieux. » L'exploitant a repensé son système de reprise et de traitement des déchets.

## Innovation

### DEMplus®, un logiciel de démantèlement virtuel

Le rendu fait penser à un jeu vidéo, mais c'est au sein d'une installation nucléaire que l'on progresse, utilise des outils, déplace des objets et cumule des « scores ».

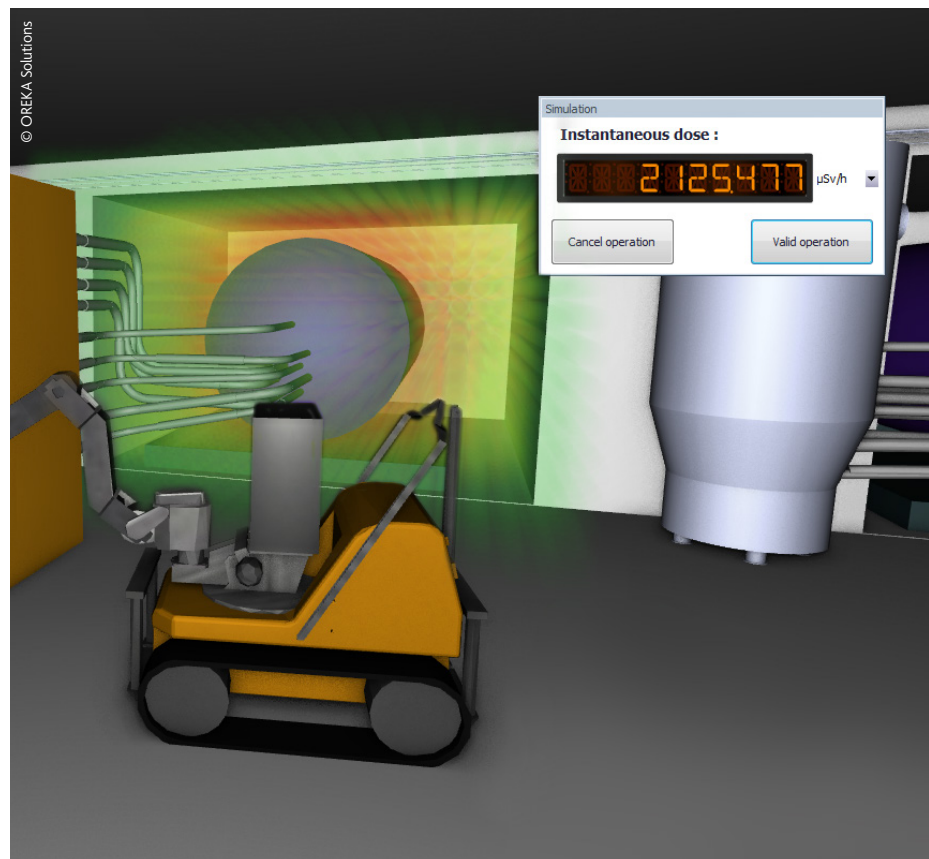
Depuis deux ans, l'IRSN teste un logiciel de simulation 3D des interventions, DEMplus®. Il est utilisé pour l'expertise du démantèlement de l'installation nucléaire de base (INB) 72, destinée à l'entreposage de déchets du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et située à Saclay (Essonne).

En complément des méthodes habituelles d'évaluation, plusieurs scénarios sont élaborés, pour la phase finale du démantèlement. L'objectif est de comparer les doses reçues par les opérateurs, la contamination atmosphérique lors des découpes et la quantité de déchets.

« Son principal intérêt est de quantifier l'influence de paramètres clés : état radiologique en début de chantier, modalités d'intervention... » précise Coralie Nyffenegger, pilote du projet.

Nous nous sommes aperçus qu'un nettoyage succinct au chiffon des puits les plus contaminés entraînait un facteur 10 de décontamination et suffisait à diviser par deux la dose collective des intervenants, alors qu'un récurage poussé n'apporte pas de gain supplémentaire significatif. »

Le logiciel est rapide à mettre en œuvre pour les modélisations simplifiées. DEMplus® est utilisé lors de formations assurées par l'IRSN.



DEMplus® est le premier logiciel de simulation destiné aux interventions dans les installations nucléaires.

Les chantiers s'étalent sur des dizaines d'années et les opérations sont complexes car le démantèlement n'a pas été suffisamment pris en compte à la conception. L'IRSN examine aujourd'hui cette question dès la conception des nouvelles installations. Le jour venu, cette anticipation facilitera les opérations associées.

### Minimiser tous les impacts

L'objectif est d'amener les exploitants à limiter les impacts du nucléaire sur l'homme et l'environnement, sans en négliger aucun. Des insuffisances dans une étude environnementale – impact des rejets chimiques, recensement des espèces... – amènent les experts à demander des compléments, les interlocuteurs étant enclins à concentrer leurs ressources sur les risques majeurs.

« Nous avons des comptes à rendre à une société de plus en plus soucieuse de ménager la planète. Même si un chantier est prioritaire, il ne peut pas être réalisé sans vérifier l'absence complète de conséquence sur l'environnement », résume Stanislas Massieux. L'impression que les choses n'avancent pas est, selon lui, trompeuse. Les techniques ont progressé et un tissu d'entreprises est en train de se créer, préfigurant une nouvelle filière. « Les 58 réacteurs à eau sous pression, de conception standardisée, ne présentent pas les mêmes difficultés que les installations anciennes. Le réacteur Chooz A est en train d'en faire la démonstration », conclut l'expert. ■





# Déchets de très faible activité : vers un recyclage des métaux ?

L'arrivée en fin de vie de nombreuses installations nucléaires va fortement augmenter les quantités de déchets de très faible activité. Les autorités et les industriels réfléchissent à diversifier leurs modes de gestion.

**A**u Tricastin (Drôme), dans l'immense usine Georges-Besse I arrêtée depuis 2012, 1400 « diffuseurs » sont en attente. Pendant trente-trois ans, ces impressionnantes structures métalliques – les plus grandes mesurent 20 mètres de haut et pèsent 130 tonnes – ont enrichi l'uranium pour une centaine de réacteurs. Nettoyées grâce à un mélange de chlore et de fluor, leur contamination radioactive résiduelle est très faible.

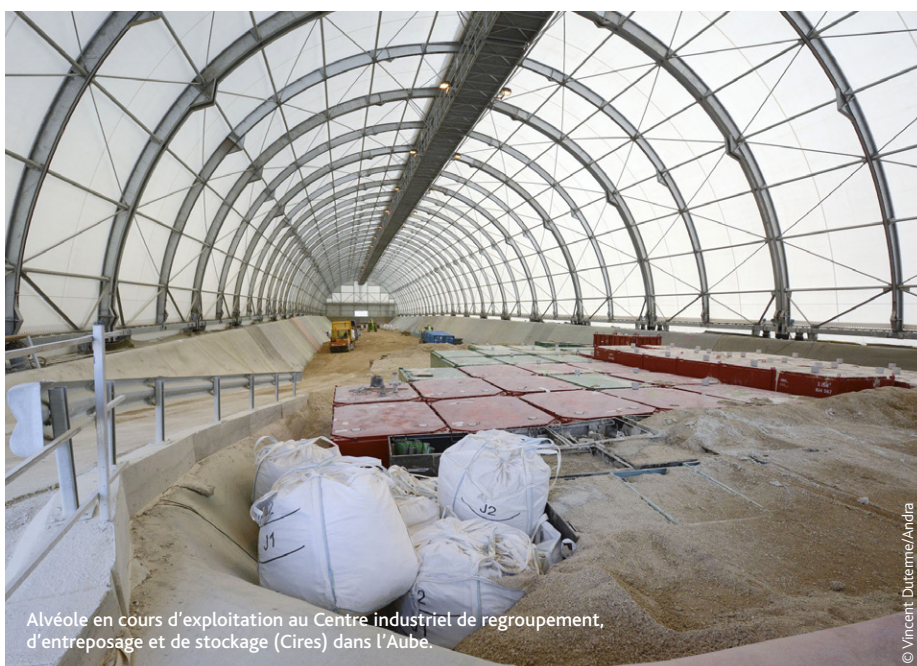
Lors de l'examen du dossier, les experts n'ont pas relevé d'obstacle technique aux opérations de dépose et de découpe de ces équipements.

Ils ont en revanche souligné les incertitudes associées à la saturation prochaine du Cires<sup>1</sup> – entre 2025 et 2030 – et au retard qu'elle pourrait induire sur le programme de démantèlement. Face à cette situation, l'exploitant étudie d'autres options.

## Une filière étudiée : la fusion des métaux

L'arrivée en fin de vie de nombreuses installations comme Georges-Besse I va générer des volumes de déchets de très faible activité sans commune mesure avec ceux issus de leur exploitation. Le dernier plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs<sup>2</sup> invitait les exploitants à explorer de nouvelles voies. Ils ont engagé des travaux pour définir le cadre dans lequel une unité de recyclage des métaux pourrait voir le jour.

Les 136 000 tonnes de métaux des diffuseurs de l'usine Georges-Besse I sont avant tout concernées. « Un premier scénario a montré qu'une telle quantité de métaux ne suffisait pas pour assurer la viabilité économique du projet, explique Marine Zilber, directrice des opérations de la filière déchets chez Orano. Nous avons besoin d'autres "gisements" : les généra-



Alvéole en cours d'exploitation au Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) dans l'Aube.

© Vincent Duteme/Andra

teurs de vapeur des 58 réacteurs à eau sous pression, qui doivent progressivement être remplacés; une partie des 10 000 tonnes de ferrailles hétérogènes déposées chaque année au Cires; des métaux venus de l'étranger... »

L'usine envisagée, qui pourrait fonctionner entre vingt-cinq et cinquante ans, repose sur une technique de fusion électrique à l'arc. Elle permet de concentrer la radioactivité résiduelle dans le laitier de fusion<sup>3</sup> qui peut ensuite être « écumé ». La technique offre aux industriels la possibilité de fondre des pièces corrodées, peintes ou comportant des parties en plastique, même lorsqu'elles sont d'assez grande dimension et ce, sans nettoyage préalable.

## Une réflexion sous surveillance

La perspective d'une filière de fusion de métaux de très faible activité suscite l'intérêt des industriels. Elle provoque

aussi l'inquiétude des associations. Comment contrôler les matériaux orientés vers ces filières? Quelles possibilités de réemploi pour les métaux recyclés? Comment prévenir les risques de dérive et d'erreur? Les questions sont nombreuses.

L'Institut ne présume pas des conclusions à la réflexion en cours sur les procédés de fusion et la diversification des exutoires de gestion des déchets de très faible activité.

Il veille à ce que l'évolution des filières assure un haut niveau de protection des travailleurs, de la population et de l'environnement. Il vérifie que les parties prenantes sont bien impliquées dans la réflexion. ■

1. Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage.

2. Le dernier PNGMDR couvre la période 2016-2018.

3. Déchets formés au cours de la fusion.





Reportage - © Sophie Brändström/Signatures/Médiathèque IRSN

**1** Xavier Masseau, expert IRSN, entre dans la centrale par un tunnel interconnecté. Chooz A a été creusée dans la roche à une époque où la technologie nécessaire à la construction des enceintes de confinement n'était pas standardisée.

**2** Dans un poste de contrôle de la caverne des auxiliaires nucléaires, Xavier Masseau examine un équipement de démantèlement à distance.

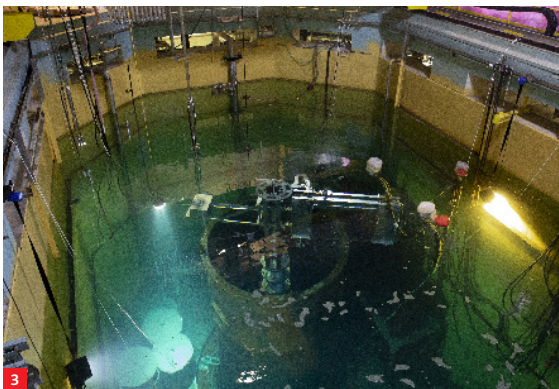
**REPORTAGE** Les experts suivent le démantèlement du premier réacteur à eau sous pression français. Un chantier instructif, notamment sur la décontamination des générateurs de vapeur.

**3** Pour protéger les opérateurs, et conformément au dossier expertisé par l'IRSN, EDF a choisi de découper la cuve sous eau, dans la piscine du réacteur.

**4** Xavier Masseau inspecte l'entrée d'un sas de traitement de déchets alpha dans lequel se trouve le couvercle de cuve.

## Chantier Chooz A

# Un laboratoire pour les futurs démantèlements



### ■ BIBLIOGRAPHIE

Avis de l'IRSN :  
[www.irsn.fr/2016-00264](http://www.irsn.fr/2016-00264)  
[www.irsn.fr/2018-00169](http://www.irsn.fr/2018-00169)

Information du public par la Commission locale d'information (CLI) : Rapport Transparence et sûreté nucléaire, 2014 : [www.cli-far92.fr](http://www.cli-far92.fr)

Le démantèlement sur [www.irsn.fr](http://www.irsn.fr) : [www.irsn.fr/demantelement](http://www.irsn.fr/demantelement)

« Démantèlement : quand la sûreté prime sur la rapidité » Repères n°16 : [www.irsn.fr/R16](http://www.irsn.fr/R16)

« Phénix : comment anticiper au mieux le démantèlement ? », Repères n° 32 : [www.irsn.fr/R32](http://www.irsn.fr/R32)

Les déchets sur [www.irsn.fr](http://www.irsn.fr) : [www.irsn.fr/dechets](http://www.irsn.fr/dechets)

### ■ CONTACTS

Démantèlement : [xavier.masseau@irsn.fr](mailto:xavier.masseau@irsn.fr)  
[stanislas.massieux@irsn.fr](mailto:stanislas.massieux@irsn.fr)  
 Recherche : [laurent.ricciardi@irsn.fr](mailto:laurent.ricciardi@irsn.fr)  
 Déchets : [diane.crozes-madec@irsn.fr](mailto:diane.crozes-madec@irsn.fr)  
[elizabeth.salat@irsn.fr](mailto:elizabeth.salat@irsn.fr)

**C**e 20 février 2019, Xavier Masseau réalise une visite technique à la centrale Chooz A, dans les Ardennes. Il connaît bien l'installation pour en avoir expertisé le dossier de démantèlement du circuit primaire, de dépose de la cuve et des auxiliaires nucléaires. Ces derniers servaient, pendant le fonctionnement du réacteur, à entreposer le combustible usé et à purifier l'eau des différents circuits. Ces opérations de démantèlement sont en cours.

« L'intérêt d'une telle visite est de suivre, de visu, les actions décrites par l'exploitant dans sa demande d'autorisation et qui sont expertisées par l'IRSN, explique Xavier Masseau. C'est d'autant plus important que Chooz A est un prototype ayant des similitudes avec les 58 réacteurs à eau sous pression en fonctionnement. » Ce chantier constitue le laboratoire de leur démantèlement futur.

La découpe, l'extraction, la caractérisation et le conditionnement des anciennes structures du cœur du réacteur sont réalisés sous eau, puis dans des cellules confinées jouxtant la piscine, le plus souvent à l'aide de commandes à distance. Les personnels se déplacent autour de la piscine en tenue de protection légère, dans un état de vigilance semblable à celui de tout chantier industriel.

En écho aux dernières recommandations, l'expert examine la conception d'un sas de confinement. Il s'intéresse à l'implantation des systèmes de ventilation, de filtration, et à la conception générale du système d'étanchéité. La visite s'achève au bout de trois heures, après avoir parcouru les deux cavernes principales. Son dosimètre indique 2 microsieverts, une dose comparable à celle d'une radiographie dentaire. ■





Une anthroporadiométrie réalisée dans un laboratoire mobile pour la surveillance du personnel exposé au CHU d'Angers (Maine-et-Loire).



Réception d'échantillons pour une analyse radiotoxologique.

## Contamination interne des travailleurs

# Quel suivi dosimétrique ?

**L'ESSENTIEL** Selon les rayonnements ionisants auxquels ils sont exposés, les travailleurs à risque sont orientés vers des analyses radiotoxologiques ou des examens anthroporadiométriques de suivi dosimétrique. **TÉMOIGNAGE** Le médecin du travail de l'Institut Gustave Roussy (Val-de-Marne). **INFOGRAPHIE** Anthroporadiométrie ou radiotoxicologie : quel examen choisir ? **AVIS D'EXPERT** Une biologiste du Laboratoire d'analyses médicales radiotoxologiques (LAMR) de l'IRSN.



**Anne Florin**

Médecin du travail  
à l'Institut Gustave Roussy  
(Val-de-Marne)

## TÉMOIGNAGE « Les soignants et manipulateurs sont les plus surveillés »

Il y a plusieurs mois, une de nos infirmières s'est très légèrement contaminée à l'iode 131 après augmentation de la dose délivrée à un patient radiotraité. Celui-ci toussait beaucoup, projetant des particules d'iode 131 dans l'air de sa chambre, respiré par l'infirmière. L'incident, heureusement sans conséquence, a été l'occasion de rappeler les consignes de sécurité : porter gants et masque, se laver systématiquement les mains, ne pas s'approcher inutilement des patients radiotraités... Une recommandation supplémentaire a été ajoutée : en cas de doute, vérifier aussitôt la contamination des mains à l'aide d'un contaminamètre. Avec deux confrères du service de santé au travail et du service de radioprotection, j'assure la surveillance médicale du personnel de l'Institut Gustave Roussy (IGR), soit environ 3000 personnes. La radiocontamination est un risque parmi d'autres – maladies infectieuses, lumbagos... Pour la contamination radioac-

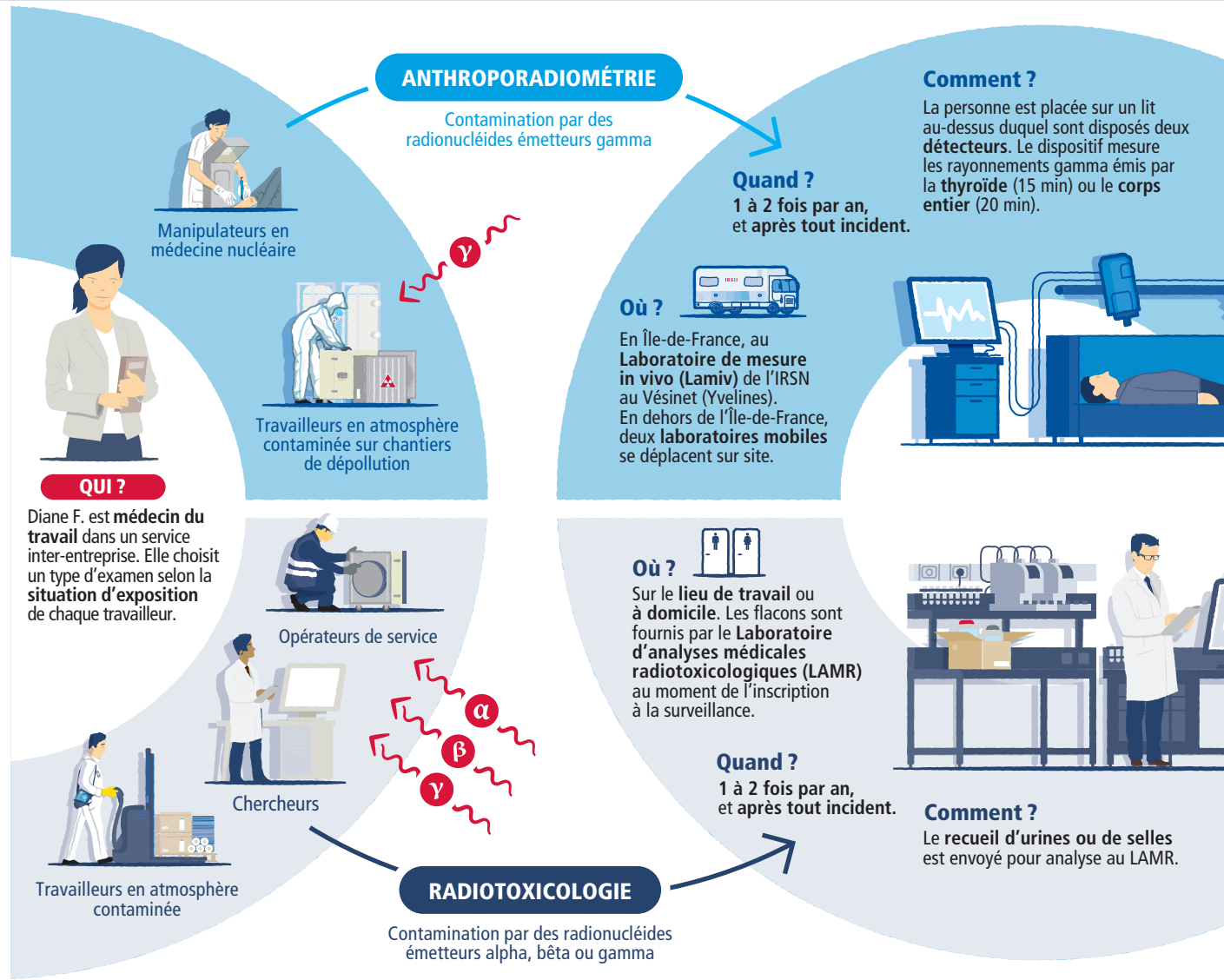
tive interne, nous suivons deux groupes à risque : les manipulateurs de médecine nucléaire, qui préparent et distribuent les radioéléments, et le personnel soignant, qui surveille les patients traités. Au total, une trentaine de personnes.

À l'IGR, différents radioéléments à durée de vie courte sont utilisés : le lutétium 177, l'iode 131 et le fluor 18. Le suivi du personnel à risque se fait au moyen d'analyses radiotoxologiques : chaque salarié doit se soumettre à un prélèvement d'urine après une période d'exposition, selon son planning de travail et celui du soignant. L'échantillon est envoyé pour analyse à l'IRSN, qui nous alerte en cas de contamination avérée, comme dans le cas de l'infirmière. De mémoire, c'est le seul résultat positif à ce jour, sans impact dosimétrique ni conséquence sur la santé pour la salariée, mais justifiant les pratiques de surveillance adoptées. ■



# Anthroporadiométrie ou radiotoxicologie : que choisir ?

Selon le radioélément du travail prescrit une analyse radiotoxicologie ou anthroporadiométrie.



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



**AGIR EN CAS D'URGENCE**

Les travailleurs à risque doivent contacter le médecin du travail de leur établissement après tout incident : erreur de manipulation, flacon renversé, poussières radioactives dans l'air... Pour vérifier une éventuelle contamination, il prescrit une analyse radiotoxicologique ou un examen anthroporadiométrique.

**BIEN RECUEILLIR LES ÉCHANTILLONS**

Le LAMR fournit avec les flacons une documentation sur les bonnes pratiques de recueil des échantillons pour les analyses. Celui des urines doit être effectué sur une durée de 24 heures. Pour les radionucléides à période courte, ou en cas d'urgence, un protocole rapide peut être suivi. Il consiste à recueillir les urines à différents moments de la journée de travail. Les flacons doivent être envoyés au plus vite au LAMR, surtout pour l'analyse des éléments à vie courte. Au-delà de 30 jours, le laboratoire refuse les échantillons.



## AVIS D'EXPERT



© Michel Tang (michel.tang.photo.com)

### Christine Bartizel

Biologiste responsable du Laboratoire d'analyses médicales radiotoxicologiques (LAMR)

## Les résultats sont précieux en cas de maladie

“ J’entends souvent dire que les analyses radiotoxicologiques sont inutiles car les résultats sont toujours négatifs. Pourtant, ils ont une signification. Lorsqu’un travailleur exposé développe, dix ou vingt ans plus tard, un cancer ou une autre maladie, disposer de ces résultats dans son dossier médical peut être utile. Il est aussi de la responsabilité du médecin du travail et de l’employeur d’assurer une surveillance dosimétrique régulière du personnel à risque. Cette démarche est encadrée par des textes réglementaires et des normes. Par la surveillance radiotoxicologique, on vérifie que les mesures de radioprotection sont efficaces et que les salariés ne se contaminent pas. Un résultat négatif est donc attendu. Attention cependant à bien recueillir les excréta et à vite les envoyer au laboratoire pour que les radionucléides puissent être décelés. Certaines personnes disent que la radiotoxicologie n’est pas assez performante pour détecter les contaminations : c’est faux. Si les recueils sont réalisés pendant les journées de travail à risque et si les flacons sont envoyés rapidement, nous mesurons l’activité dans la foulée. Nos seuils de détection sont très bas. Il n’y a que le fluor 18 que nous ne pouvons pas détecter. Seule une anthroporadiométrie réalisée sur site, à la sortie du poste de travail, permet de le détecter.

ment manipulé et la situation d’exposition, le médecin aux travailleurs un examen anthroporadiométrique ou toxicologique. Les deux peuvent se compléter en cas de urée.

### Avantages

- Les résultats sont **immédiats**.
- L’examen permet de détecter les **radioéléments à vie courte** – technétium 99, fluor 18 – juste après leur manipulation.



### BÉNÉFICES

- Pour les médecins du travail et les professionnels exposés :
- Surveiller les **risques professionnels**
  - Disposer d’un **suiti dosimétrique**
  - Respecter une **obligation réglementaire**
  - Rappeler les **consignes de radioprotection**

### Résultats

Ils sont envoyés au médecin du travail sous **15 à 30 jours**.

### Résultats

Ils sont envoyés au médecin du travail sous **48 heures** (émetteurs gamma) ou **1 à 3 semaines** (émetteurs bêta et actinides).

### Avantages

- La procédure est **simple** sans déplacement du travailleur.
- L’analyse permet de détecter **tous les types d’émetteurs** y compris ceux dont le niveau d’énergie gamma est trop faible pour l’anthroporadiométrie.

### PARTAGE DES RÉSULTATS

La directive européenne<sup>1</sup> relative à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements a évolué. Elle autorise maintenant le médecin du travail à communiquer les résultats des examens à la personne compétente en radioprotection (PCR) de l’entreprise. PCR et médecins du travail peuvent solliciter l’avis du biologiste médical et des experts en dosimétrie de l’IRSN pour identifier les examens adaptés.

1. Article R. 4451-70-I du décret n° 2018-437 du 4 juin 2018.

### CONTACTS

Laboratoire d’analyses médicales radiotoxicologiques (LAMR)  
[lamr@irsn.fr](mailto:lamr@irsn.fr) - 01 30 15 52 35

Laboratoire de mesure in vivo (Lamiv)  
[lamiv@irsn.fr](mailto:lamiv@irsn.fr) - 01 30 15 37 56



Christine Bartizel  
 01 30 15 52 43  
[christine.bartizel@irsn.fr](mailto:christine.bartizel@irsn.fr)



# Les lycéens découvrent la radioprotection

Bastia, Boulogne-Billancourt, Poitiers... Des lycéens de France, mais aussi des abords de Tchernobyl et Fukushima, ont participé aux rencontres de la radioprotection à l'IUT de Cherbourg (Manche). L'occasion de discuter de radioactivité, débattre de radioprotection et comparer des dispositifs de mesure.

## 1 Quel est l'objectif des rencontres internationales lycéennes de la radioprotection ?

Ces rencontres visent à développer une connaissance de la radioactivité et une culture de la radioprotection chez les élèves, à travers des échanges avec des professionnels. Au programme : exposés, stands d'exposition, rencontres d'experts et visites techniques de sites. Les lycéens présentent leurs travaux et confrontent leurs expériences. Cette année, pour la douzième édition de l'événement, des élèves de seconde, première et terminale de douze lycées français, deux lycées biélorusses, un lycée moldave et un lycée japonais, se sont réunis pendant trois jours à l'IUT de Cherbourg. Pour Sylvie Charron, spécialiste de l'ouverture à la société et de la prospective stratégique à l'IRSN, ces journées sont l'aboutissement d'un travail réalisé durant

toute l'année scolaire. Les projets ont été coconstruits par les élèves, leurs enseignants et des chercheurs en radioprotection. Les rencontres sont organisées par l'IRSN, le Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN), l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), le Pavillon des sciences du Centre de culture scientifique, technique et industrielle (CCSTI) de Bourgogne-Franche-Comté et la Société française de radioprotection (SFRP).

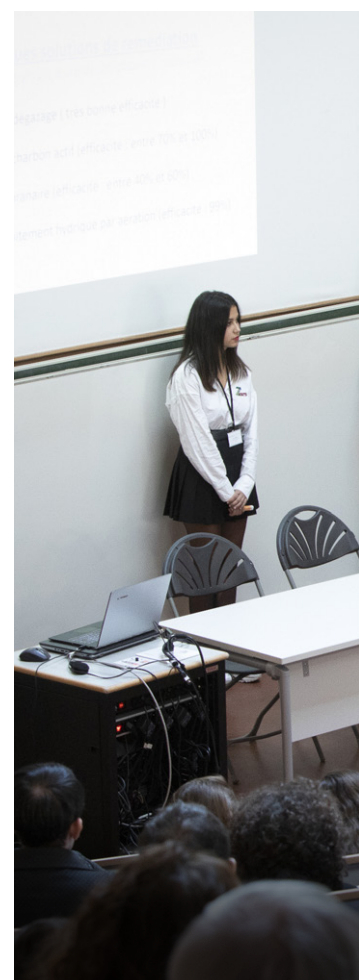
**www** Pour en savoir plus : [www.lesateliersdelaradioprotection.com](http://www.lesateliersdelaradioprotection.com)

## 2 Quels sont les sujets abordés ?

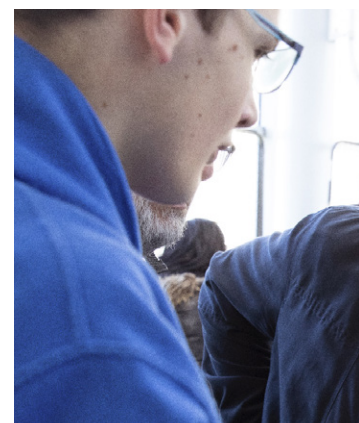
Radiothérapie lors d'un cancer, radioprotection des équipages lors de voyages interplanétaires, radioactivité en mer... les sujets sont variés et présentés par les groupes de lycéens en amphithéâtre, à partir de vidéos qu'ils ont réalisées. L'après-midi, sur des stands, ils expliquent leurs travaux. Ici sont exposés des seins en plâtre, là un pluviomètre. Sur une table, de la vapeur s'échappe d'une maquette. « *Nous évaluons le meilleur emplacement pour des balises de radiodétection dans un milieu confiné, selon les ventilations disponibles* », expliquent Rodrigue Gryz et Willy Pautrat, élèves au lycée professionnel Nelson-Mandela d'Audincourt (Doubs).



Tiffany Beaumont montre des m de th



Les élèves du lycée de l'Europe de Dunkerque présentent sous forme de jeu leur étude sur la radioprotection cosmique.





(IRSN), modèles thyroïde.



## 3 Comment élèves et chercheurs travaillent-ils ?

« J'ai reçu les élèves du lycée Notre-Dame de Boulogne-Billancourt (Hauts-de-Seine) pour leur expliquer mon travail », raconte Tiffany Beaumont, chercheuse au Laboratoire de mesures in vivo (Lamiv) du Vésinet (Yvelines), où elle élabore des fantômes thyroïdiens. Ces modèles physiques de thyroïdes humaines à différents âges sont utilisés

pour étalonner les détecteurs. « La différence de volume de la thyroïde est un paramètre important pour mesurer correctement l'exposition », précise Matthieu Olekhovitch, un lycéen. Cet exercice de transmission des connaissances met le travail de la chercheuse en perspective. « Vulgariser est stimulant », souligne-t-elle.



Des lycéens de Fukushima Highschool (Japon) font goûter au public un jus de pêche biologique préparé dans leur province.



Les élèves du lycée Gioacante de Casabianca à Bastia (Haute-Corse) restituent leur exposé sur la présence du radon dans l'eau potable.

## 4 Que présentent les étrangers ?

« Nous participons à ces rencontres depuis six ans car pour nous, voisins de l'Ukraine, la radioprotection est un sujet utile », explique Zinaïda Virlian, enseignante de français au lycée moldave Prometeu Prime. Avec le professeur de physique, elle accompagne sept élèves de seconde qui ont travaillé sur les concentrations en radon dans les caves à vin de Cricova. Plus loin, les élèves de Fukushima Highschool présentent des actions mises en place dans le secteur agricole pour remédier à la contamination des sols après l'accident. « Certaines activités reprennent, comme la production des pêches », précise un lycéen, qui offre à la dégustation du jus de fruits de sa province. En face, deux groupes d'élèves biélorusses : l'un a travaillé sur la mesure de la radioactivité à Kamaryn<sup>1</sup> ; l'autre, de l'école francophile Blaise-Pascal de Gomel, présente son projet sur la concentration en césium 137 dans les muscles des oiseaux après l'accident de Tchernobyl. « La contamination interne est un vrai problème car les gens continuent à chasser et pêcher », explique Volha Dzehtsiarova, leur professeur de français.

<sup>1</sup> Voir notre article dans le prochain numéro de Repères.

Reportage photo : © Sophie Brandström/Signatures/Médiathèque IRSN

## 5 Quel est l'apport pour les enseignants ?

« Même si je connaissais la radioactivité, j'ai découvert la radioprotection avec mes élèves », raconte Aude Ducouret, professeure de physique-chimie au lycée Notre-Dame de Boulogne-Billancourt (Hauts-de-Seine). Elle retient de cette expérience une passion partagée. « Enseignants comme élèves, nous avons pris sur notre temps personnel. Nous avons abordé les sciences autrement en travaillant différemment », poursuit-elle. Ces échanges offrent aux

enseignants des approches transdisciplinaires et pratiques. Elles favorisent ensuite la compréhension des cours théoriques. « Ces rencontres suscitent des vocations chez les jeunes et les poussent à réaliser des études supérieures », conclut l'enseignante.



Un élève du lycée Louis de Broglie de Marly-le-Roi (Yvelines) présente le dispositif de mesure OpenRadiation.

 **CONTACT**  
Sylvie Charron  
sylvie.charron@irsn.fr



# Radiopharmacie

## Préparer des médicaments avec rigueur et précaution

Le Dr Valérie Causse-Lemerrier est radiopharmacienne à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris. Sa mission : mettre à disposition des radiopharmaceutiques, dans le respect des règles de radioprotection du personnel, du patient et de l'environnement.

« **A**vec 65 mg d'iode de potassium par comprimé, il en faut deux pour atteindre les 100 mg d'iode recommandés pour un adulte », détermine Valérie Causse-Lemerrier, responsable de l'unité fonctionnelle de radiopharmacie à la Pitié-Salpêtrière, à Paris (Île-de-France). En concertation avec Agnès Dumont, radiopharmacienne, et Émilie Hubert, cadre de santé, elle définit un protocole avec prise d'iode stable pour protéger la thyroïde lors d'un examen de diagnostic. Celui-ci nécessite l'injection d'un radiopharmaceutique contenant de l'iode 123 radioactif.

### Se protéger...

Pour remplir ses missions de radioprotection, Valérie Causse-Lemerrier a suivi une spécialisation complémentaire en radiopharmacie et radiobiologie. « Toute préparation de radiopharmaceutiques est nominative, destinée à un patient donné. Les commandes sont optimisées pour limiter l'exposition du personnel qui les manipule et la production de déchets radioactifs », indique-t-elle.

Dans les locaux de l'unité, Antoine Debrienne, manipulateur en électroradiologie médicale (MERM), réceptionne le colis de transport d'un médicament fluoré radioactif dans le local de livraison radioprotégé. Il exécute cette tâche avec précision et rapidité. « Pour limiter son exposition, le personnel joue constamment sur trois paramètres : le temps, la distance et les écrans », explique Valérie Causse-Lemerrier.

Le manipulateur vérifie la conformité de la livraison, contrôle les informations inscrites sur le bon de livraison et l'intégrité du conditionnement avec l'existence de scellés intacts. Dans le laboratoire de préparation, il insère le flacon de médicament dans un pot plombé, puis dans un automate. Ce dernier assure la production des doses patient par fractionnement aseptique de la dose transférée. Chaque dose unitaire est placée dans une chope plombée étiquetée,

que le MERM dépose dans un guichet transmurale. L'étiquette précise l'activité du produit au moment de la préparation : 188,3 MBq à 10h24. « La période physique du fluor 18 est très courte : la radioactivité diminue de moitié toutes les deux heures, explique-t-il. J'ai toujours un œil rivé sur l'évolution de l'activité, mesurée en continu à l'aide des activimètres de l'automate. » Valérie Causse-Lemerrier a en amont défini l'ensemble des mesures de radioprotection visant à réduire l'exposition du patient : « Nos protocoles permettent d'encadrer les activités prescrites par les médecins et de contrôler les doses produites. »

Une chope est redéposée dans le guichet transmurale : ce radiopharmaceutique fluoré vient d'être injecté à un patient. Antoine Debrienne débarrasse la chope de sa cartouche vide en orientant son extrémité ouverte, seule partie non plombée, vers le mur pour minimiser son exposition. Il la stocke ensuite dans une poubelle en plomb. Équipé d'un dosimètre passif, d'un dosimètre opérationnel et d'un dosimètre bague, il va répéter l'opération pour les quarante patients prévus ce jour.

### ... pour mieux soigner

Derrière les portes plombées qui les isolent, les malades attendent leur examen dans des pièces individuelles. Étant radioactifs, ils disposent de toilettes dédiées pour protéger l'environnement. D'autres patients sont déjà pris en charge pour la réalisation de leur imagerie. Deux manipulateurs en installent un sur la table du TEP-IRM en prenant toutes les précautions liées au champ magnétique de l'IRM. « Au-delà de l'imagerie diagnostique, notre maîtrise des préparations radiopharmaceutiques permet aussi de soigner », rappelle le Dr Valérie Causse-Lemerrier. ■



### Élaborer les protocoles

De gauche à droite, Valérie Causse-Lemerrier, responsable de l'unité de radiopharmacie, Agnès Dumont, radiopharmacienne, et Émilie Hubert, cadre de santé à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris (Île-de-France), discutent des protocoles de prise en charge des patients.

**DIAPORAMAS**  
Retrouvez tous les reportages!

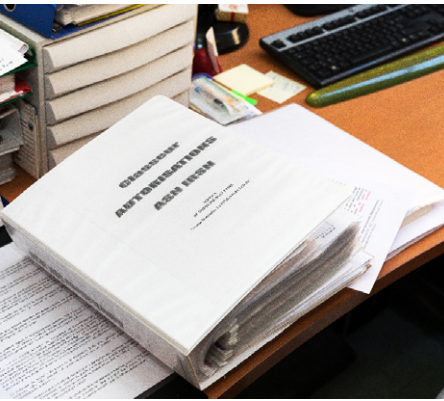
**La radioprotection des professionnels**

Des consignes de radioprotection claires et des contrôles fréquents

[www.irsn.fr/R42](http://www.irsn.fr/R42)

© L. Vaumont/Médiathèque IRSN





## Conserver toutes les autorisations

Dans un épais classeur, Valérie Causse-Lemercier conserve les autorisations de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et les formulaires de fourniture de sources émis par l'IRSN. Valables cinq ans, ils sont indispensables pour passer des commandes de radiopharmaceutiques. Des numéros sont attribués selon la nature du radioélément et de l'utilisation qui en sera faite à des fins de diagnostic, de thérapie ou de recherche.



## Réceptionner les colis radioactifs

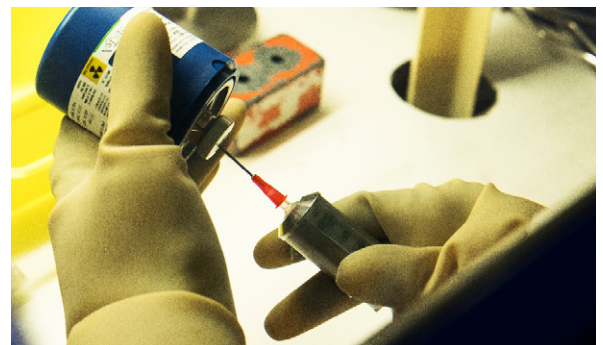
Les colis scellés contenant les radiopharmaceutiques sont déposés dans un local spécifique radioprotégé. Une fois contrôlés, ils sont transférés par Antoine Debrienne, manipulateur en électroradiologie médicale (MERM) dans le laboratoire de préparation. Le circuit par lequel transitent les colis puis les médicaments a été conçu afin de réduire au maximum l'exposition du personnel.



## Respecter les règles de radioprotection

Le manipulateur sort une chope en plomb contenant une cartouche radioactive. Cette chope permet d'acheminer le médicament radiopharmaceutique de la zone de production jusqu'au box d'injection dans le respect de la radioprotection. Elle est conçue pour y adapter une aiguille et un piston de seringue pour injecter le médicament.

Reportage photo © Laurent Vaulont/Médiathèque IRSN



## Assurer le suivi de qualité pharmaceutique

Agnès Dumont, radiopharmacienne, procède au contrôle qualité d'un médicament radiopharmaceutique utilisé pour les scintigraphies cardiaques. Elle réalise une chromatographie sur couche mince avec une préparation de tétrafosmin marquée au technétium 99m. La pureté radiochimique témoignera de la qualité du médicament, indispensable pour un examen réussi.

## Préparer les médicaments radioactifs

Certaines préparations sont réalisées manuellement. Dans une enceinte radioprotégée de haute énergie, le manipulateur prépare une dose de microsphères en résine marquées à l'yttrium 90. Elle sera dispensée pour une thérapie par radio-embolisation. Ses gestes sont rapides et précis pour limiter l'exposition de ses doigts.



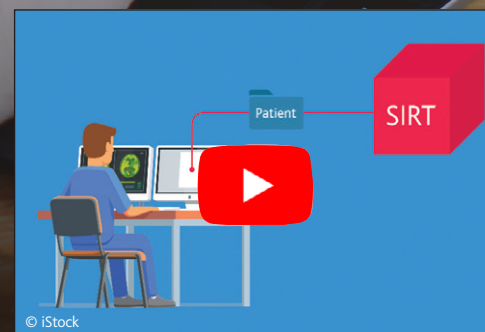


# Avec le webmagazine, accédez à des contenus exclusifs

## Le magazine *Repères* existe au format numérique.

Des contenus complémentaires sont publiés : articles, vidéos, reportages photo et infographies. Découvrez, grâce à des vidéos pédagogiques, la prévention des événements en radioprotection dans le médical, l'intervention des sapeurs-pompiers lors d'un exercice de crise ou encore les règles de radioprotection au musée du Louvre...

Connectez-vous sur [www.irsnn.fr/reperes](http://www.irsnn.fr/reperes) pour accéder à ces prolongements web, commander des anciens numéros ou choisir le format de votre abonnement.



## Pour en savoir plus

[www.irsnn.fr/reperes](http://www.irsnn.fr/reperes)

