

N°36
JANVIER 2018

Le magazine de l'IRSN

REPERES

IRSN

INSTITUT
DE RADIODÉPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

EN PRATIQUE

La surveillance
des eaux de surface

DOSSIER

Radiothérapie Lutter contre les effets indésirables

FAITS ET PERSPECTIVES

Gaine du combustible :
maîtriser le risque de corrosion





Tout savoir sur les radionucléides

Vingt-deux fiches sur l'utilisation de radionucléides sont disponibles sur irsn.fr. Pour chacun, elles font la synthèse des informations les plus pertinentes et des bonnes pratiques de prévention. Élaborées par des groupes de travail animés par l'IRSN et l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS), elles sont destinées aux utilisateurs, personnes compétentes en radioprotection et médecins du travail.

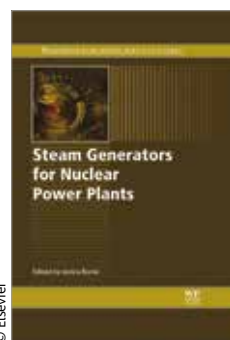
www.irsn.fr/fiches-IRSN-INRS

Conception des réacteurs : un guide

Élaboré par l'ASN et l'IRSN, ce document de référence regroupe des recommandations en matière de sûreté pour la conception des réacteurs à eau sous pression. Il traite de la prévention des incidents et des

accidents radiologiques et de leurs conséquences. Il expose les objectifs et les principes de conception et formule des recommandations pour répondre aux exigences réglementaires.

www.irsn.fr/guide-ASN-22



© Elsevier

Un état de l'art des générateurs de vapeur

Deux experts de l'IRSN ont collaboré à ce *handbook*. Ian De Curières a rédigé un chapitre sur les mécanismes de corrosion liés à l'environnement primaire et secondaire des générateurs de vapeur (GV). Thierry Sollier s'est intéressé aux contrôles non destructifs des GV. *Steam Generators for Nuclear Power Plants*, éditions Elsevier.

<https://www.elsevier.com/books/steam-generators-for-nuclear-power-plants/riznic/978-0-08-100894-2>



Sûreté et radioprotection : les rapports 2017

L'Institut publie deux rapports sur la sûreté et la radioprotection en France. Il s'agit d'une analyse des événements significatifs déclarés à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Le premier document concerne les 58 réacteurs du parc électronucléaire. Le second s'intéresse aux 76 installations de type « laboratoires, usines, installations de traitement, d'entreposage ou de stockage de déchets et installations en démantèlement » et aux 9 réacteurs de recherche exploités dans le pays.

www.irsn.fr/parc-2016
www.irsn.fr/INB-hors-REP-2015-2016

Agenda

5 au 7 février 2018

Université de Nîmes (Gard)

Une exposition sur le nucléaire

Cette exposition pédagogique itinérante informe sur les risques liés à la radioactivité et au nucléaire. Elle vise à sensibiliser, de façon ludique, les enfants et les citoyens sur des sujets comme les déchets radioactifs, les accidents nucléaires, l'environnement... Elle est proposée par l'IRSN et l'ASN en partenariat avec l'Iffo-RME¹.

1. Institut français des formateurs risques majeurs et protection de l'environnement.

Plus d'information : www.irsn.fr/expo

23, 28 et 29 mars 2018

Journées PCR

Au mois de mars 2018, venez rencontrer les experts en dosimétrie de l'IRSN lors des journées PCR¹ : le 23 lors de la journée du Réseau PCR Sud-Ouest (ReSO) au Haillan (Gironde), le 28 lors du séminaire du Réseau PCR Grand Ouest à l'université de Caen (Calvados) et le 29 à l'occasion de la journée du Réseau PCR Rhône-Alpes à l'Ifsi de Saint-Étienne (Loire).

1. Personnes compétentes en radioprotection

Plus d'information : dosimetre.irsn.fr

24 et 25 mai 2018

Toulouse

Journée scientifique des manipulateurs

L'IRSN tiendra un stand lors des 59^{es} Journées scientifiques de l'Association française du personnel paramédical d'électroradiologie (AFPPE) qui se tiendra au Palais des congrès de Toulouse (Haute-Garonne).

Plus d'information
new.afppe.com

On line WEBMAG

DIAPORAMA



Reportage dans un service de médecine nucléaire

Imagerie : une équipe sensibilisée aux bonnes pratiques



Le projet OpenRadiation : les citoyens s'emparent de la mesure



OpenRadiation : le montage de l'appareil de mesure

Abonnement

POUR VOUS ABONNER :

www.irsn.fr

Rubrique l'IRSN > Publications
 > Magazine Repères

Sommaire

En couverture : Un infirmier et une technicienne installent un patient atteint d'un cancer ORL pour une radiothérapie avec un accélérateur.

P.4 TEMPS FORTS

Dispersion atmosphérique et marine
Des outils de modélisation adaptés pour les Émirats arabes unis



EPR Flamanville 3
La démonstration de sûreté est expertisée

P.6 FAITS ET PERSPECTIVES

Combustibles **Nouvelles règles contre les ruptures et les déformations**

P.9 ZOOM

Les chercheurs se mettent au vert

DOSSIER

P.10

Dossier du prochain n° :
**Génie civil :
un enjeu de sûreté**

**Radiothérapie
du cancer**
**La lutte contre les effets
indésirables s'amplifie**

P.17 EN PRATIQUE

Surveillance radiologique
Le contrôle de la pollution des eaux de surface

P.20 INTÉRÊT PUBLIC

**OpenRadiation : les citoyens
s'emparent de la mesure**



P.22 REPORTAGE

Physicien médical
Le garant des niveaux de référence diagnostiques



© Noak / Le bar Floréal / Médiaquique IRSN

Radiothérapie : au coeur de la recherche

La radiothérapie sauve de plus en plus de vies. Cela répond bien sûr à la préoccupation première des médecins, et de leurs patients. Mais à mesure que les malades guérissent, et vivent plus longtemps, les éventuelles conséquences à long terme de ces traitements apparaissent. L'IRSN collabore donc avec les médecins cliniciens pour réduire les risques d'effets secondaires, notamment sur les tissus sains. Le dossier de ce numéro de *Repères* le montre : notre Institut et ses chercheurs disposent de compétences et de connaissances étendues, acquises notamment dans le cadre des travaux sur le traitement des irradiés graves. Désormais réorganisées pour être plus efficaces, nos équipes ont vocation à développer leurs travaux dans le domaine de la recherche préclinique et à renforcer leur présence, au niveau national et international, au sein de la communauté des radiobiologistes et des radiothérapeutes autour de cet enjeu.

Jean-Christophe Gariel

Directeur du pôle santé à l'IRSN

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.fr – Courriel : reperes@irs.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, Georges Henri Mouton – Rédaction et réalisation : **CITIZENPRESS** – Iconographie : Sophie Léonard – Photos de couverture : © Amélie-Benoist/BSIP, © EDF/Damien Charfeddine – Impression : Galaxy (72) – Imprimé sur Cyclus print – ISSN : 2103-3811 et 2491-8776 (web) – Janvier 2018.

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Recherche

Améliorer la connaissance des incendies

L'IRSN participe au groupe de travail Mesure et calcul des phénomènes incendie (MaCFP). Son but : mettre à disposition des spécialistes de l'incendie une base de données de cas tests de référence destinés à valider les logiciels de simulation, mais aussi organiser des benchmarks basés sur ces tests et partager les bonnes pratiques. L'Institut est intervenu lors d'un premier atelier organisé au mois de juin dernier à l'université de Lund (Suède). Les experts ont présenté le logiciel CALIF3S-ISIS, efficace pour réaliser une modélisation représentative des résultats expérimentaux. L'IRSN proposera des cas de tests de référence pour les feux en milieu confiné et ventilé mécaniquement, environnement caractéristique des installations nucléaires. Il s'impliquera dans la simulation numérique des feux pour améliorer son logiciel et participer aux échanges de connaissances au sein de la communauté des chercheurs.

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

RECHERCHE EN RADIOTHÉRAPIE

425

C'est le nombre de gènes impliqués dans la réaction de la paroi vasculaire aux rayonnements ionisants. Ce chiffre a été mis en évidence par le programme de recherche sur les effets indésirables des radiothérapies Rosiris.

180 000

patients reçoivent un traitement par radiothérapie chaque année en France. Retrouvez notre dossier en page 10.

Environnement



Vue satellite d'une tempête de sable sur les Émirats arabes unis.

NASA image by Jeff Schmaltz, MODIS Rapid Response Team

Dispersion atmosphérique et marine

Des outils de modélisation adaptés pour les Émirats arabes unis

Aider les Émirats arabes unis à se doter d'outils de modélisation de la dispersion – atmosphérique et marine – des radionucléides, adaptés aux conditions environnementales de la région, c'est l'objectif d'un accord de collaboration de R&D signé en 2016 entre l'IRSN et la FANR¹, l'autorité de sûreté nucléaire émiratie. « Nos outils de modélisation sont adaptés à des climats européens, souligne Jacqueline Garnier-Laplace, experte en environnement à l'Institut. C'est une occasion de partager nos compétences et de renforcer notre expertise en comprenant l'influence de caractéristiques environnementales particulières. »

Spécificités climatiques

Soumis à des températures élevées, les pays du golfe Arabique sont caractérisés par une sécheresse climatique susceptible d'influencer la dispersion atmosphérique. « Les nombreux épisodes de tempête de sable facilitent la remise en suspension de particules, précise Emma-

nuel Bosc, expert en radioprotection de la FANR. La dissémination marine mérite également d'être étudiée de près, dans un golfe de moins de 30 mètres de profondeur sur plus de 50 % de sa surface, où la température de l'eau atteint les 36 °C en été. » L'eau de mer sert à alimenter la population en eau potable. Pour cela, elle est traitée dans des centaines d'unités de dessalement réparties le long de la côte. Les travaux de recherche commenceront après la validation d'une feuille de route commune à la FANR, ses partenaires locaux (université de Khalifa et Centre national de météorologie) et l'IRSN, attendue pour début 2018. Les Émirats sont engagés dans un programme de développement de l'énergie nucléaire, avec pour projet de mettre un premier réacteur en service en 2018.

1. Federal Authority for Nuclear Regulation.

www Pour en savoir plus,
<https://fanr.gov.ae/>
www.irsn.fr/20170419

Sûreté



Salle de commande de l'EPR de Flamanville. Un ingénieur de l'IRSN est sur place pour suivre les essais de démarrage.

© Alexis Morn / Médiaéque IRSN

EPR de Flamanville 3

La démonstration de sûreté est expertisée

Afin d'examiner la demande d'autorisation de mise en service du réacteur EPR Flamanville 3, l'IRSN expertise le dossier de sûreté transmis par EDF. L'Institut présente ses conclusions devant le groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires (GPR).

« Il s'est réuni à cinq reprises pour évaluer les aspects principaux de la démonstration de sûreté, indique Vincenzo Tiberi, pilote pour l'IRSN. Nous avons par exemple demandé à l'exploitant de définir une stratégie de gestion ultime en cas de perte totale, et sur une longue durée, des sources électriques ou de refroidissement. L'industriel a mis à jour son dossier en juin 2017. La prochaine réunion

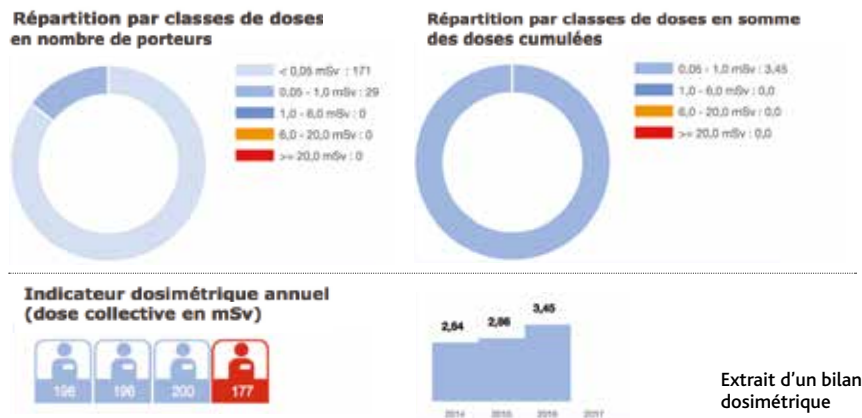
du GPR, en juin 2018, sera consacrée au bilan global de l'expertise de la démonstration de sûreté. Ce bilan donnera lieu à un avis sur lequel s'appuiera l'Autorité de sûreté nucléaire pour prendre position sur la mise en service du réacteur. » Par ailleurs, l'Institut suit depuis avril 2017 les essais d'ensemble pour vérifier le bon fonctionnement des circuits.

À ce jour, le calendrier fourni par EDF prévoit le chargement en combustible en décembre 2018, puis une montée progressive de la puissance nominale jusqu'à 100 % en 2019.

WWW Pour en savoir plus : www.irsn.fr/dossier-EPR

“ En juin 2018, les experts évalueront le bilan global de la démonstration de sûreté.

Santé



mondosimetre 5.1.8 © 2017 IRSN. Tous droits réservés.

Étude

Les effets du vent sur la dispersion des radionucléides

La dispersion des radionucléides en mer est un phénomène complexe. Pour affiner ses connaissances, l'IRSN s'est associé à l'étude HYD2M¹ sur les processus hydrodynamiques dans le Raz Blanchard (Manche).

« Ce passage situé entre le Cotentin et l'île d'Aurigny est un lieu de très forts courants. C'est une zone atelier exceptionnelle. Notre objectif est d'améliorer les modèles de simulation des rejets de radionucléides en mer », explique Pascal Bailly du Bois, ingénieur en océanographie. Si la principale finalité de ce travail est de soutenir l'essor des énergies marines renouvelables, l'Institut s'intéresse en particulier aux effets du vent sur la houle et le courant. « Nous voulons acquérir des mesures hydrodynamiques et météorologiques durant une longue période afin de connaître l'effet du vent sur le déplacement des radionucléides dissous dans l'eau », précise l'ingénieur.

1. Hydrodynamique du Raz Blanchard : mesure et modélisation. Projet financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR), rassemblant 13 partenaires académiques et industriels français et étrangers.

mondosimetre.fr

Le suivi dosimétrique est facilité

“ **A**ujourd'hui, je peux générer des bilans dosimétriques moi-même de façon très simple et en quelques clics depuis le portail mondosimetre.fr », explique Pascal Damien, personne compétente en radioprotection (PCR) au CHRU de Brest (Finistère). C'est un avantage de taille pour ce professionnel qui, chaque année, présente au CHSCT² un bilan pour l'ensemble du personnel exposé, soit 1000 travailleurs. « Jusque-là, j'adressais mes demandes au laboratoire de dosimétrie de l'IRSN. C'est un plus en termes d'autono-

mie ! Il est également possible de modifier la périodicité ou de restreindre la requête à un service. J'effectue des suivis plus réguliers et plus ciblés, par exemple pour une catégorie de personnel en particulier. Avec cet outil, je peux aussi identifier les services dont les dosimètres sont hors délai. »

1. Conçu par l'IRSN.
2. Comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail

WWW Pour en savoir plus : www.irsn.fr/dosimetrie
<https://mondosimetre.irsn.fr/>

WWW Pour en savoir plus : <http://hyd2m.criann.fr/>



Stéphanie Graff, Sandrine Boutin et Aude Taisne (de g. à dr.) sont expertes en analyse du comportement du combustible.

© Laurent Zylberman / Graphix Images / MédiaPartique / ASN



Mise en eau des assemblages de combustible neufs à la centrale nucléaire de Saint-Alban (Haute-Garonne).

© EDF/Damien Charfeddine

Combustibles des réacteurs

Nouvelles règles contre les ruptures et les déformations

Les crayons et les assemblages de combustible des réacteurs du parc nucléaire français évoluent pour mieux maîtriser les risques de corrosion ou de déformation en exploitation. L'expertise de l'IRSN a contribué à faire modifier les règles de sûreté appliquées par EDF.

Au cœur des réacteurs nucléaires, les crayons de combustible représentent un enjeu majeur pour la sûreté. Au cours des dix dernières années, experts et exploitants ont étudié les risques de corrosion des gaines et de déformation des assemblages. Par ailleurs, des essais expérimentaux sont menés pour approfondir les connaissances et de nouvelles règles de sûreté sont définies pour les réacteurs français. Les gaines des crayons de combustible constituent la première barrière de confinement qui sépare la matière radioactive de l'environnement. Depuis fin 2016, le Zircaloy-4, alliage historique de ces gaines, n'est plus utilisé pour les combustibles neufs. Cela représente l'aboutissement de longs échanges entre l'exploitant EDF, l'IRSN et l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

Dès 1988, l'industriel étudie le remplacement du Zircaloy-4. En cause : la corrosion

du zirconium – constituant principal du Zircaloy-4 – par l'eau du circuit primaire à 300 °C. La réaction fragilise le matériau qui, en cas d'accident, risque de se rompre (voir infographie). « *Ce phénomène est connu dès l'origine. À partir de 1988, les problèmes se posent avec plus d'acuité car EDF souhaite allonger les cycles d'exploitation des cœurs et augmenter les taux de combustion atteints. Nous craignons une corrosion accrue des gaines* », explique Olivier Dubois, expert en maîtrise des incidents et accidents à l'IRSN.

Le problème devait être résolu par le remplacement, sur l'ensemble du parc, du Zircaloy-4 par l'alliage M5¹, plus résistant à la corrosion. « *En 2001, des percements sont constatés sur les premières gaines en M5* », indique Aude Taisne, experte en combustibles. La généralisation du nouvel alliage est suspendue. « *Nous engageons alors une*

expertise avec l'ASN. » Des investigations sont menées dans les usines de fabrication de combustible d'Areva. Les conclusions pointent des dysfonctionnements relatifs au soudage des gaines et à l'insertion des crayons dans les grilles de maintien. Des actions correctives sont mises en place par le fabricant. Les conditions de propreté lors du soudage sont améliorées, tout comme la lubrification des crayons avant leur insertion dans le squelette d'assemblage. En 2014, la généralisation du M5 est autorisée.

L'exploitation des réacteurs modifiée

Dans l'intervalle, une question se pose : comment assurer la sûreté des installations fonctionnant encore majoritairement avec des gaines en Zircaloy-4 ? Pour y répondre, les experts s'appuient sur des résultats d'expérimentations réalisées avant

Détail des palets d'oxyde d'uranium dans les crayons de combustible.

© Noak/Le bar Floréal/Médiathèque IRSN

2000 dans le réacteur de recherche Cabri implanté à Cadarache (Bouches-du-Rhône). Des crayons déjà corrodés sont soumis à un accident de réactivité simulant l'éjection d'une grappe de contrôle. « Ce retrait provoque un emballement de la réaction nucléaire et les pastilles de combustible s'échauffent très vite. Elles se dilatent et exercent des contraintes importantes sur la gaine, qui risque de se rompre », détaille Olivier Dubois (voir infographie). Les experts utilisent le logiciel Scanair, développé par l'IRSN. « Il sert à modéliser l'ensemble des phénomènes en jeu : échauffement et gonflement du combustible, déformation de la gaine et relâchement de gaz de fission... », explique Olivier Marchand, expert en simulation du comportement du combustible.

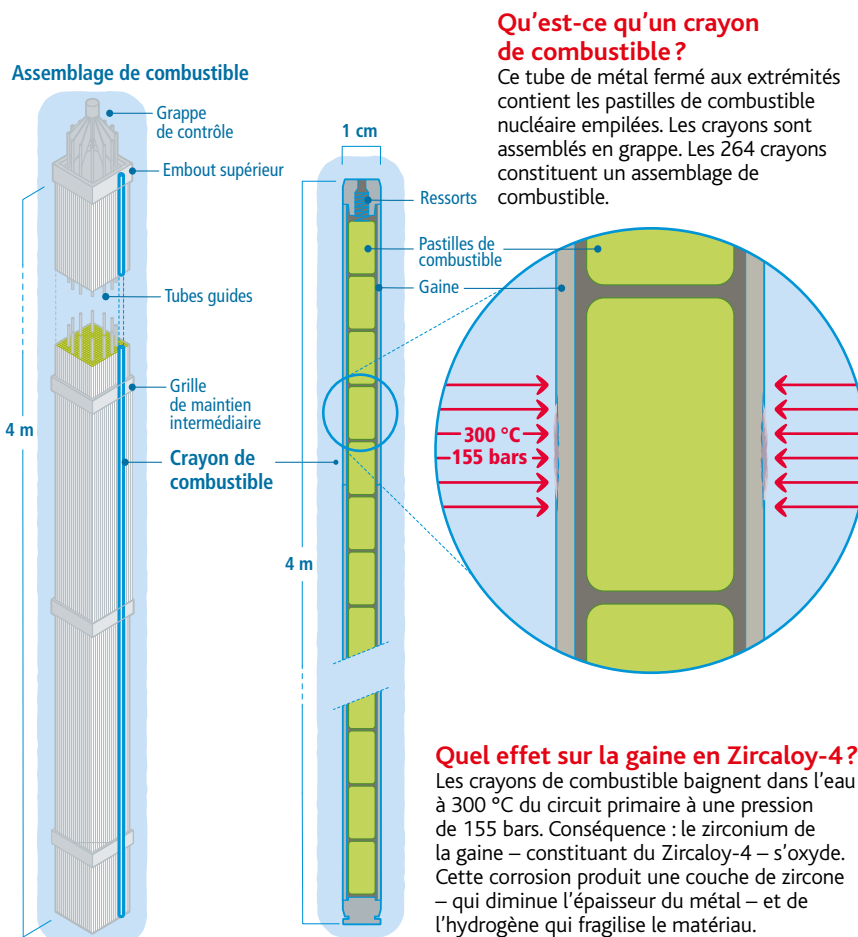
Les seuils de 80 et 108 micromètres

En s'appuyant sur l'interprétation de ces essais avec Scanair, des seuils limites d'épaisseur de corrosion sont identifiés. Au-dessus de 80 micromètres, il y a un risque potentiel de rupture de gaine. Si l'épaisseur dépasse 108 micromètres, le risque est avéré. Sur la base de ces valeurs, l'Institut préconise des mesures compensatoires, imposées par l'ASN. « Au-dessus de 108 micromètres, le combustible concerné doit être remplacé. Au-dessus de 80 micromètres, le réacteur doit être exploité avec les grappes de contrôle en position haute pour limiter les effets d'une éjection », résume Olivier Dubois. Les conséquences sont immédiates : l'industriel est obligé de modifier les règles d'exploitation de son parc nucléaire (voir interview p. 8). Un suivi semestriel est opéré par EDF pour s'assurer du respect des mesures compensatoires. « Il n'a donné lieu à aucune alerte depuis 2014 », se félicite Olivier Dubois.

PROCESS

Gaines en Zircaloy-4 : quels sont les risques ?

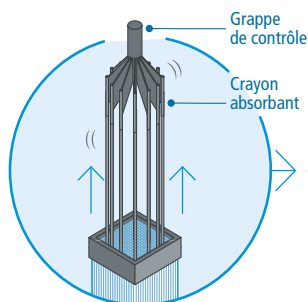
Les gaines des crayons de combustible du parc français ont été conçues avec du Zircaloy-4. Pourquoi cet alliage va-t-il être remplacé ? Quel est le risque pour les réacteurs français ? Explications.



Quels sont les risques ?

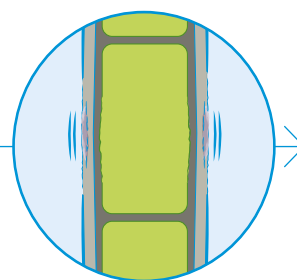
1 L'éjection de la grappe de contrôle

Elle contient des matériaux capables d'absorber les neutrons et donc de contrôler la réaction nucléaire. En cas de rupture de son mécanisme, la grappe peut se relever brutalement, ce qui se traduit par un emballement local de la réaction nucléaire.



2 Le risque de rupture

Les pastilles de combustible montent rapidement en température : jusqu'à 2 500 °C en quelques dizaines de millisecondes. Elles se dilatent et exercent une poussée sur la gaine du crayon. Fragilisée, la gaine risque de se rompre.



3 Les conséquences

En cas de rupture, des gaz de fission – xénon, krypton, hélium... –, voire des matières solides très chaudes et radioactives, sont libérés dans le circuit primaire. Le cœur n'est plus correctement refroidi, pouvant conduire à un accident grave.





Arrivée de combustible neuf dans le bâtiment BK1 du CNPE du Tricastin : vérification de la tige combustible.

© EDF/Frédéric Sautereau

En 2010, une autre anomalie affecte certains réacteurs en fonctionnement : la déformation d'assemblages. Maintenus verticalement dans la cuve, entre deux plaques, par la compression de ressorts à lames, ils tendent à se courber latéralement de quelques millimètres. « À cause de cette déformation, certaines grappes de contrôle chargées d'assurer l'arrêt rapide du réacteur si besoin chutent moins rapidement dans les tubes guides des assemblages », expose Olivier Dubois.

En 2014, lors d'un essai, cinq grappes de contrôle du réacteur 2 de Nogent (Aube) n'ont pas pu s'insérer totalement. Pour traiter cette anomalie, EDF a proposé de supprimer une des lames des ressorts pour réduire la compression. « Nos équipes ont vérifié les calculs fournis par l'exploitant et ont conclu que les assemblages resteraient bien maintenus », se souvient-il.

Réactualisation des règles

Tous ces enseignements sont mis à profit lors de la réunion du groupe permanent pour les réacteurs (GPR) de juin 2017 consacrée à la réactualisation des règles relatives au combustible. « Certaines étaient issues des recommandations de Westinghouse, qui a conçu les premiers réacteurs français. Or des paramètres ont évolué depuis. Le taux de combustion maximal autorisé est notamment passé de 33 à 52 GWj/tU et le mode de pilotage des réacteurs a changé », constate Olivier Dubois.

De futurs essais menés avec le réacteur Cabri à partir de 2018 permettront de confirmer les nouveaux critères. ■

1. L'alliage M5 est composé de zirconium à environ 98 %, de niobium, d'oxygène et de fer.

Comment EDF met en place les mesures compensatoires ?

Nous évaluons les niveaux de corrosion des crayons grâce à des modélisations. Lors de chaque arrêt, nous nous assurons que la gaine ne franchira pas la limite de 108 micromètres d'épaisseur de corrosion. En 2017, nous avons trois réacteurs pour lesquels, en l'absence d'action particulière, la limite serait dépassée avant un arrêt planifié. Dans ces cas-là, nous programmons des coupures de production sur des périodes creuses afin de freiner la corrosion. La limitation liée au

Zircaloy-4 et est maîtrisée ; elle entraîne des pertes de production.

Et concernant le second seuil de 80 micromètres ?

Il impose de faire fonctionner certains réacteurs avec les grappes de contrôle relevées. Cela implique qu'ils tournent à plein régime. Le Centre opérationnel production marché d'EDF (COPM), indique en amont quand une tranche va entrer en « surveillance Zircaloy-4 ». Les installations concernées fournissent la base de la

production. Les modulations sont assurées par les centrales fonctionnant « sans contrainte ».

Combien de réacteurs sont sous surveillance en 2017 ?

Vingt et un réacteurs sont concernés. Quatre autres ne contiennent qu'une faible proportion de crayons en Zircaloy-4, et sont placés en périphérie, où ils sont beaucoup moins irradiés. Il y a un risque potentiel que ces réacteurs soient placés sous surveillance.

Fin 2018, nous n'aurons plus que 10 réacteurs sous surveillance et 15 sous surveillance

« potentielle ». Puis, en 2020, respectivement 1 et 20. En 2021, le Zircaloy-4 aura pratiquement disparu du parc.

3 questions à...

Jean-Marc Rodriguez

Délégué d'état-major combustibles (EDF)



Deux inspecteurs de l'autorité américaine NRC à la centrale Browns Ferry (Alabama).

Source NRC

AILLEURS

Aux États-Unis, des nouveaux critères de sûreté

L'autorité américaine NRC (Nuclear Regulatory Commission) a récemment imposé de nouvelles règles relatives à l'accident d'éjection de grappe de contrôle. Elle s'est penchée sur un autre accident majeur : la perte de réfrigérant sur le circuit primaire¹. « L'IRSN a recommandé de prendre en compte le phénomène de ballonnement des crayons et ses conséquences », indique Olivier Dubois, expert en maîtrise des incidents et accidents à l'IRSN. La NRC a lancé des analyses sur

cette thématique, mais n'a pas encore formulé de demande en ce sens aux exploitants. L'organisme japonais de recherche en sûreté (JAEA) a mené des essais de simulation pour étudier les conséquences sur le combustible de son refroidissement brusque par le système d'injection de secours. « Les règles françaises ont été adaptées en tenant compte de ces essais », précise-t-il.

1. La fuite d'eau provoque un échauffement rapide et un gonflement des gaines de combustible, le temps que le système d'injection de secours prenne le relais.

Les chercheurs se mettent au vert

Philippe Laguionie

Ingénieur-chercheur hydrologue à l'IRSN

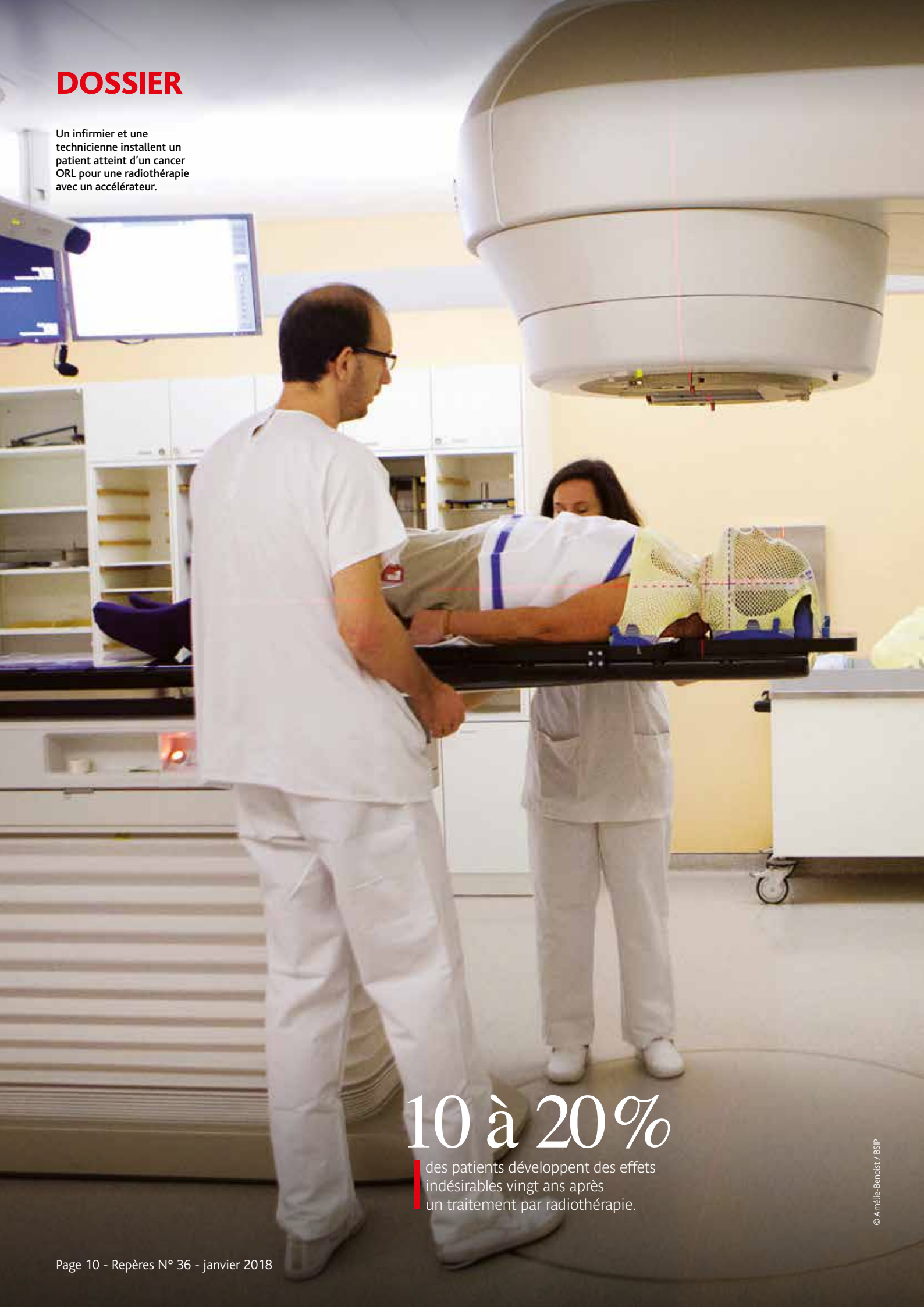
Sur une parcelle expérimentale, sous les vents dominants de l'usine Areva NC de La Hague (Manche), des chercheurs se font jardiniers. Ils cultivent l'herbe de prairie, dont nous voyons ici un échantillon. Le but : mesurer les transferts dans l'environnement du tritium (hydrogène radioactif), épisodiquement rejeté dans l'air par les cheminées de l'usine. Il peut s'associer à l'oxygène dans la molécule H_2O et se retrouver dans l'eau, la terre et dans l'herbe des prairies voisines,

elle-même ingérée par les vaches, puis dans leur lait, et finalement dans les produits laitiers consommés par l'homme. En conditions normales, les rejets contrôlés sont très faibles et ne présentent pas de risque. Ces recherches visent à comprendre les phénomènes de transfert. Des prélèvements d'herbe, d'eau et de sol ont par exemple mis en évidence que des bactéries incorporent du tritium gazeux dans l'eau, ensuite absorbée par les végétaux. Les chercheurs ont ajouté ce processus au

modèle mathématique Toccata, intégré dans la plateforme Symbiose – utilisée par des experts en cas d'accident nucléaire – qui prédit le transfert des radionucléides dans l'environnement. Ce modèle aidera l'Institut à proposer aux pouvoirs publics les mesures nécessaires pour protéger les populations (interdiction de certains aliments par exemple). Ce projet sur l'herbe de prairie est arrivé à son terme en 2017. Les travaux se poursuivent avec des cultures de légumes. ■

DOSSIER

Un infirmier et une technicienne installent un patient atteint d'un cancer ORL pour une radiothérapie avec un accélérateur.



10 à 20%

des patients développent des effets indésirables vingt ans après un traitement par radiothérapie.

Radiothérapie du cancer

La lutte contre les effets indésirables s'amplifie

Aux côtés des professionnels de santé, les chercheurs veulent comprendre et mesurer les effets de la radiothérapie sur le corps humain. En ligne de mire pour les patients, des traitements plus efficaces contre les tumeurs avec de moindres dommages collatéraux sur les tissus sains.



Les chercheurs collaborent avec les praticiens pour améliorer le traitement du patient.

Est-il possible de mieux cartographier et quantifier les rayonnements ionisants qui touchent les tissus sains? « Avec les nouvelles techniques de radiothérapie – guidage par imagerie et modulation d'intensité – nous ciblons plus précisément les tumeurs et nous irradiions moins les zones périphériques avec de fortes doses. En revanche, nous touchons davantage le corps entier avec de faibles doses. Nous augmentons l'efficacité contre le cancer et nous diminuons les effets secondaires immédiats et certains à long terme. Cependant, il reste des inconnues... », rapporte le Pr Éric Deutsch, chef du service de radiothérapie de l'Institut Gustave-Roussy de Villejuif (Val-de-Marne), le premier centre européen de lutte contre le cancer. Au titre de son activité en radioprotection, l'IRSN étudie les effets sur les tissus sains des traitements utilisant les rayonnements ionisants.

Le but premier des radiothérapies est de détruire les cellules malades. Cela se fait parfois au prix d'effets collatéraux : problèmes cardiovasculaires, douleurs, troubles digestifs, risques de maladies secondaires... De plus en plus de cancers sont guéris et l'espérance de vie des patients augmente. En conséquence, davantage d'effets indésirables interviennent longtemps après la guérison. L'objectif des recherches en radiothérapie est de réussir à optimiser les doses administrées pour limiter ces effets secondaires.

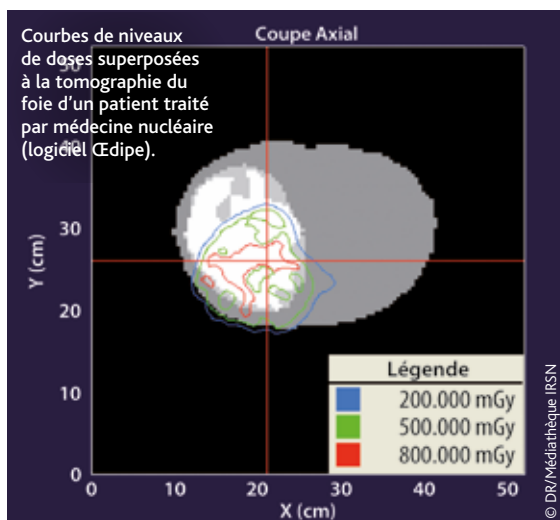
Les effets des neutrons secondaires en protonthérapie

Isabelle Clairand, chercheuse en dosimétrie, se penche sur la protonthérapie. Cette radiothérapie par les protons a la particularité de créer des neutrons secondaires – produits par l'appareil et par le corps du patient lui-même – dont les effets ont besoin d'être mieux estimés. Trois thèses successives ont été menées sur ce thème. En partenariat avec l'Institut Curie d'Orsay (Essonne) et le Centre Antoine



© Noak / Le Bar Floreal / Institut Curie

Distribution de doses d'un plan de traitement par protonthérapie d'un jeune patient atteint d'une tumeur de l'hypophyse (Centre de protonthérapie de l'Institut Curie, à Orsay – Essonne).



“ Alphathérapies : un terrain totalement nouveau à défricher.

Lacassagne de Nice (Var), les équipes de l'Institut ont créé des outils de mesure et de calcul spécifiques à ces rayons atypiques. Puis elles ont étudié le comportement des lignes de faisceau et ont développé un modèle mathématique pour prédire ces doses secondaires sur de nombreux organes : poumons, foie, cœur, reins... « Notre modèle n'est pas encore utilisable en clinique, mais il donne des ordres de grandeur... », commente Isabelle Clairand. À terme, il devrait permettre aux professionnels de proposer des plans de traitement efficaces, mais avec moins de risques d'effets secondaires.

Les techniques par mini-faisceaux sont dans le viseur de Christelle Huet, chercheuse en dosimétrie. Les travaux en cours ont pour objet de développer des techniques de mesure plus précises de la dose délivrée par les plus petits de ces faisceaux – champs inférieurs à 1 cm. À terme, grâce à ces connaissances, les praticiens pourront utiliser les plus petites tailles de faisceaux disponibles sur leurs appareils de traitement.

Quelles conséquences sur le cœur ?

En raison de sa position anatomique dans la région thoracique, le cœur est un organe à risque pour la radiothérapie du sein. Il a été démontré que, jusque dans les années 1990, ces radiothérapies étaient responsables d'une mortalité accrue par maladie cardiovasculaire. Aujourd'hui, les traitements sont plus protecteurs, mais Sophie Jacob, épidémiologiste à l'IRSN, veut connaître les doses résiduelles reçues au cœur et leurs éventuelles conséquences. Elle a lancé le projet Baccarat : « Des études sont réalisées sur de grandes cohortes pour connaître les complications à long terme au niveau de cet organe. Nous menons une étude clinique observationnelle et prospective avec la clinique Pasteur, à Toulouse (Haute-Garonne). Nous suivons les patientes dès leur entrée en traitement et pendant deux

ans après la radiothérapie. » Des examens médicaux réguliers, notamment d'imagerie cardiaque sont réalisés, pour observer les éventuelles lésions au cœur avant qu'elles ne soient symptomatiques ou entraînent un risque cardiovasculaire avéré.

« Nous voyons les zones les plus sensibles et les plus exposées de l'organe. Nous espérons proposer des mesures de prévention comprenant l'optimisation de la dose aux structures les plus critiques du cœur. Nous travaillons sur l'identification précoce des patientes à risque et la mise en place d'un suivi ad hoc. »

La juste dose pour le malade

Administrer les rayons via un médicament porteur d'un atome radioactif, et non plus par un faisceau extérieur : la technique est connue depuis la Seconde Guerre mondiale. Grâce aux progrès de la génétique, depuis la fin des années 2000, de nouveaux médicaments sont développés dans ce domaine. Il s'agit de radiothérapie « interne vectorisée » ou médecine nucléaire thérapeutique. La substance radioactive est liée à une molécule se fixant spécifiquement sur les cellules cancéreuses, ou à des structures comme des microsphères, qui se « coincent » dans certains vaisseaux pour délivrer les rayons à un endroit précis. Ces traitements, le plus souvent administrés par voie intraveineuse, sont pour l'instant prescrits de manière assez empirique : les quantités reçues sont essentiellement définies en fonction de la corpulence des patients. Or ces médicaments ne vont pas au même endroit et dans les mêmes proportions chez tous les patients. Une fraction peut se loger dans des tissus sains, y compris à distance de la tumeur visée. C'est pourquoi il est important de trouver le moyen de définir, pour chaque malade, la juste dose, nécessaire et suffisante.

Cette problématique se pose avec plus d'acuité depuis l'apparition récente d'alphathérapies. Par rapport aux radiopharmaceutiques à rayonnement bêta, « ils délivrent une énergie bien plus importante, et sur une distance très courte. Ils sont plus efficaces pour détruire la tumeur, mais il faut d'au-

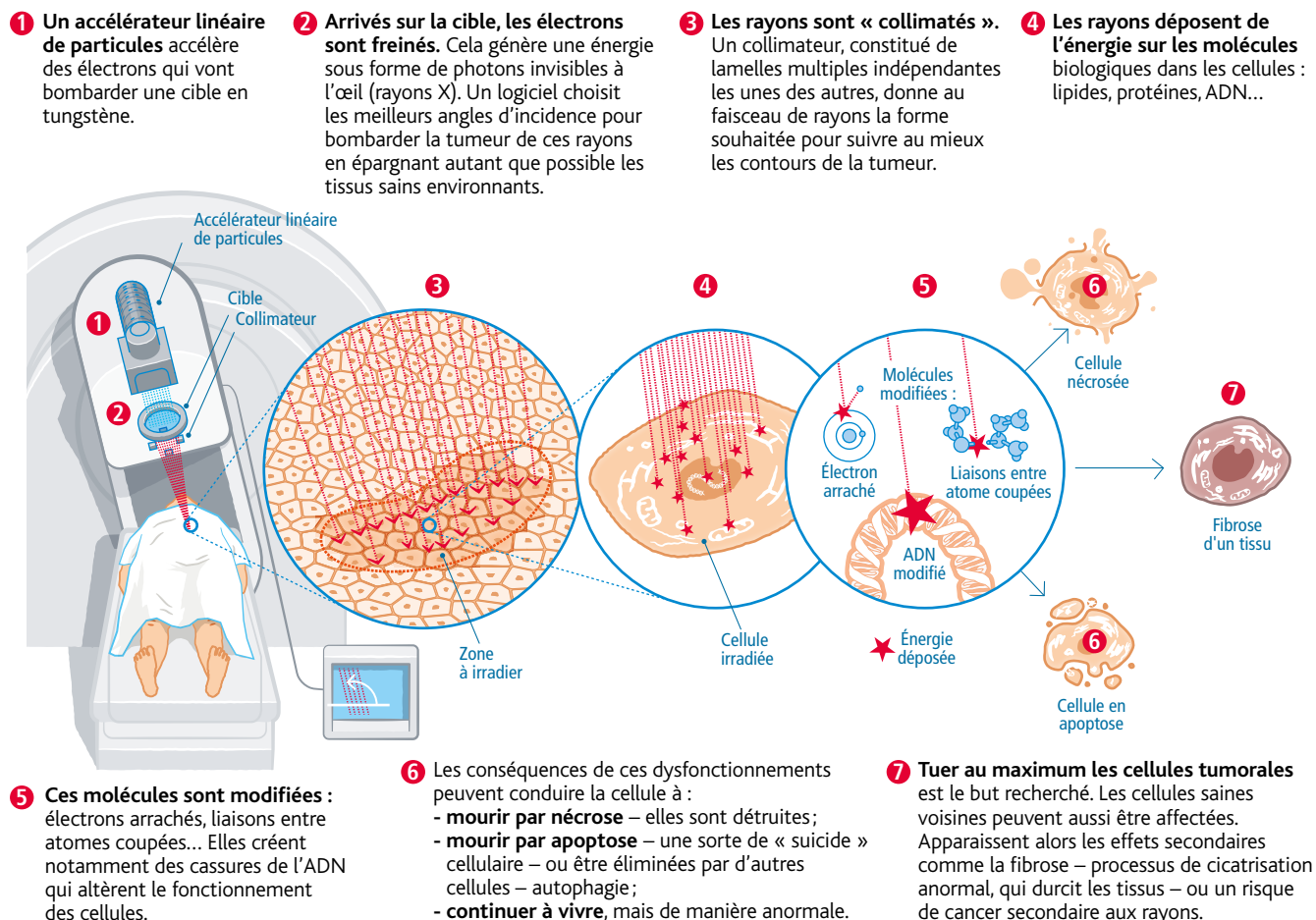
1 à 2 %

des patients développent des effets indésirables cinq ans après une radiothérapie.

EN CLAIR

De la particule au corps entier : l'action des rayons

Henri D., atteint d'un cancer, est soigné par radiothérapie. Les rayonnements ionisants qui irradient la tumeur agissent sur la matière au niveau subatomique. Cela entraîne des conséquences en cascade à l'échelle moléculaire, tissulaire et de l'organisme entier.



© Antoine Dagan/Citizen Press/IRSN/Magazine Repères

tant plus limiter leur diffusion à distance de la zone à traiter. C'est un terrain totalement nouveau et nous sommes en train de le défricher, commente Aurélie Desbrée, spécialiste de la dosimétrie interne. Il nous faut revoir les calculs, les outils, les procédures, les logiciels... Nous espérons pouvoir aider les médecins à prescrire des traitements plus adaptés à chaque patient. » L'IRSN mène des recherches avec le service de médecine nucléaire de l'Hôpital européen Georges-Pompidou, à Paris

Pour des outils utilisables en clinique

Le Pr Florent Cachin, du Centre de lutte contre le cancer Jean-Perrin, à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme), président de la Société française de médecine nucléaire, croit beaucoup aux perspectives de ces techniques : « L'an dernier, une radiothérapie interne vectorisée utilisant des émetteurs alpha a montré des résultats extraordinaires dans le cancer de

la prostate. » Il souligne l'importance de développer des recherches pour mieux comprendre les variations d'efficacité d'un patient à l'autre. Son souhait : obtenir de nouvelles connaissances mais aussi des outils facilement utilisables en clinique, « comme le logiciel *CEdipe*, développé par l'IRSN, qui indique la dose absorbée organe par organe ».

Dernier écueil, les nouvelles techniques sont souvent dites « guidées par l'image ». De nombreux scanners sont réalisés au cours du traitement pour appliquer les rayons plus précisément, mais ils utilisent des rayons X et rajoutent de faibles doses à celles des traitements. « Nous manquons de recul : nous ne savons pas si en réglant un problème à court terme, nous n'en créons pas d'autres à long terme. Nous avons des contacts réguliers avec l'IRSN et nous sommes dans un dialogue continu sur ces questions. Pour autant, sans ces traitements, nous ne pourrions pas guérir les patients », conclut le Pr Deutsch. ■

www Pour en savoir plus
Dossier : Mieux protéger le patient en radiothérapie.
www.irsn.fr, base de connaissances
Repères n°15, pages 10 à 16

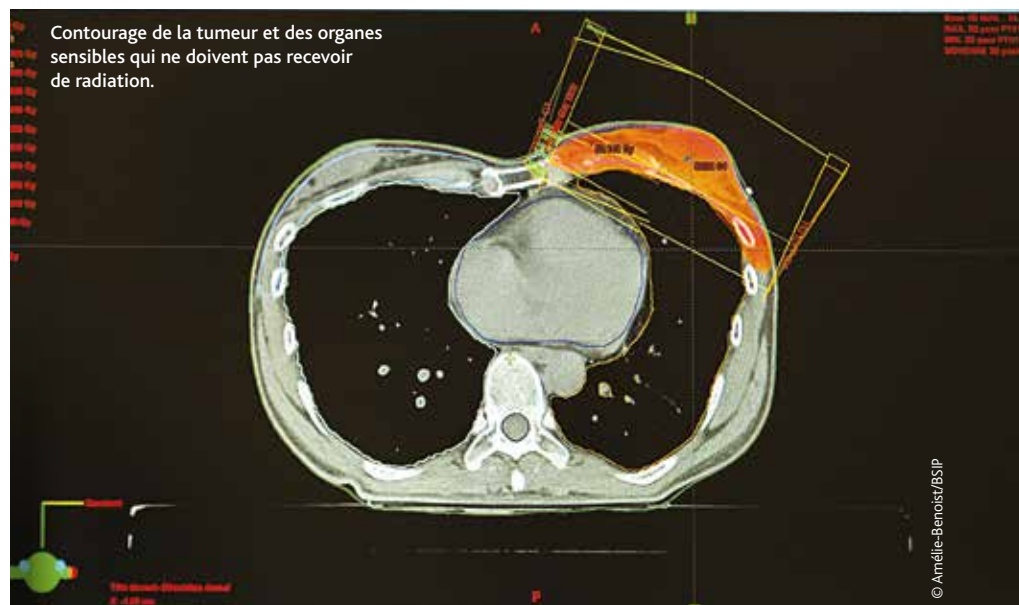
Rayons ionisants : prédire et réparer les lésions

Plusieurs travaux visent à comprendre les effets des rayons sur les cellules et les tissus. Des chercheurs analysent également les dysfonctionnements dans l'organisation qui conduisent à des erreurs de dose. Pour les séquelles qui n'ont pu être évitées, l'Institut étudie des traitements à base de cellules souches.

Explorer à chaque échelle les mécanismes de la radiothérapie : la production des rayonnements, leurs effets sur les molécules, les cellules, les tissus vivants, puis trouver des moyens de réparer les lésions indésirables. C'est l'objet du programme de recherche Rosiris, lancé en 2009 par l'IRSN. « Pour l'instant, médecins et physiciens médicaux ne disposent que de modèles partiels ou imprécis pour estimer les effets des rayons, précise Jean-François Bottollier-Depois, physicien, impliqué dans le volet physique de Rosiris. L'interface entre la partie physique du rayonnement et son action biologique comporte encore des zones d'ombre. Rosiris réunit physiciens et biologistes. Nous avons une meilleure vision des différents processus qui vont de la physique des dépôts d'énergie aux effets biologiques précoces à l'échelle subcellulaire, en passant par les étapes chimiques. C'est un travail de longue haleine ! »

Comprendre les mécanismes de la fibrose radio-induite

Marc Benderitter, biologiste, se penche quant à lui sur la complexité de la réponse des tissus sains à l'irradiation. « Certains patients peuvent développer



des effets toxiques aigus, souvent réversibles mais parfois tardifs et irréversibles. Ces derniers sont majoritairement associés à des fibroses radio-induites (durcissement des tissus). Ils peuvent altérer la qualité de vie des patients à long terme : douleurs, troubles digestifs, respiratoires, métaboliques... Nous cherchons à comprendre les mécanismes biologiques de la fibrose radio-induite. » Les chercheurs de l'IRSN ont travaillé sur le CTGF¹, molécule clé de cette pathologie. « À ce jour, nous étudions une approche par la "biologie des systèmes" pour comprendre, dans sa globalité, le réseau moléculaire mis en jeu. Nous décrivons ces processus complexes dans le temps et l'espace, en prenant en compte toutes ces échelles », complète-t-il. Cette connaissance précise de la pathologie permettra d'identifier de nouvelles cibles thérapeutiques et de proposer de nouveaux tests de prédiction des risques de complications des radiothérapies.

Une étude clinique observationnelle appelée EpiBrainRad analyse les complications des radiothérapies de certaines tumeurs du cerveau : œdème et leucoencéphalopathie, qui causent des troubles du comportement et de la mémoire. Quels protocoles thérapeutiques, pour quelle

dose délivrée, avec quelles conséquences ? Les résultats devraient être connus dans les prochaines années.

17 incidents analysés

Sylvie Thellier et Valérie Vassent, expertes en facteurs humains à l'IRSN, s'intéressent aux défauts organisationnels qui peuvent conduire à des erreurs de fractionnement et d'étalement de la dose en radiothérapie et à des surdosages des patients : « Nous cherchons les

RÉGLEMENTATION

Code de la santé publique

Les articles L.1333-1 et suivants définissent les règles qui s'appliquent pour la radioprotection de la population. Ils imposent notamment à toutes les activités nucléaires les trois principes de justification, optimisation et limitation de l'exposition aux rayonnements ionisants. Toutefois, une dérogation à ce 3e principe est précisée pour les usages médicaux pour lesquels un dépassement des limites peut être justifié par le bénéfice thérapeutique attendu pour les patients. Ce chapitre du Code de la Santé publique régit l'autorisation des appareils et des sources de rayonnement. Il impose une évaluation, par l'IRSN, des doses auxquelles est exposée la population.

contextes organisationnels et techniques qui favorisent la survenue d'erreurs. L'objectif est de proposer des mesures correctrices. » Saisi par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), l'Institut a examiné 17 incidents de radiothérapie signalés entre 2013 et 2015. « Nous avons mis en évidence des facteurs d'erreur : des périodes de congés, des plans de traitement complexes, multiples ou inhabituels, l'absence de prescription médicale initiale... », décrivent-elles. L'Autorité a récemment publié des recommandations² aux professionnels : plus grande formalisation des prescriptions, intégration des systèmes informatiques afin de limiter les saisies manuelles de données...

L'Institut mène des études thématiques sur certaines difficultés. Sylvie Thellier propose par exemple l'organisation d'espaces de partage de l'activité pour que les professionnels identifient les risques lors de la préparation et de l'administration d'une radiothérapie. Ce travail en cours, objet de la thèse soutenue par Sylvie Thellier³ en décembre dernier, a fait l'objet de plusieurs articles dans des revues professionnelles

Recherches sur les cellules souches

Pour les séquelles qui n'ont pas pu être évitées, l'Institut travaille sur de nouveaux traitements. Jusqu'à présent, seules des chirurgies mutilantes sont proposées. Qui plus est, les tissus, fragilisés par la radiothérapie, peinent à cicatriser correctement. Mais des stratégies innovantes font leurs preuves. Elles s'appuient notamment sur les cellules souches mésenchymateuses (CSM), des cellules issues de la moelle osseuse qui favorisent la régénération des tissus vivants.

Pour l'instant, les chercheurs testent chez l'animal la meilleure façon d'administrer un tel traitement : combien d'injections ? Quelles voies privilégier : locale ou intraveineuse ? Ils perfectionnent les outils de culture de ces CSM, car il faut les produire in vitro en nombre et les purifier. Les travaux sont suffisamment avancés et l'Institut national du cancer a accepté de financer un essai clinique. Baptisée Prisme, cette étude impliquera l'IRSN, la plateforme e-Cell France, chargée de produire les cellules, et cinq établissements prenant

AILLEURS

Pays-Bas

Les cellules souches au secours des glandes salivaires

Différentes équipes européennes explorent des stratégies pour soigner les effets radio-induits. L'équipe du Pr Rob Coppes, à la faculté de médecine de Groningen, aux Pays-Bas, a récemment obtenu des résultats prometteurs dans ce domaine. Lors d'une radiothérapie dans la zone du cou, les glandes salivaires sont souvent affectées. Leur cancer guéri, les anciens malades souffrent d'effets secondaires très invalidants : difficultés à s'alimenter, déchaussement des dents... « Nous avons prélevé des cellules-souches de glandes salivaires humaines et les avons cultivées in vitro avec des facteurs de croissance, explique Rob Coppes. Nous avons obtenu la multiplication et la différenciation de ces cellules immatures en cellules de glandes salivaires fonctionnelles.

Transplantées chez l'animal, ces dernières se sont bien intégrées et ont restauré la production de salive. Nous espérons démarrer un essai clinique l'an prochain, en prélevant des cellules souches chez les patients avant une radiothérapie et en réimplantant les cellules transformées à la fin des traitements. » Des interactions scientifiques avec plusieurs équipes nationales et internationales permettent de mutualiser les avancées obtenues. L'IRSN a également publié une étude en 2014 sur le sujet.

Antioxid Redox Signal. 2014 Jul 10;21(2):338-55. doi: 10.1089/ars.2013.5652. "Stem cell therapies for the treatment of radiation-induced normal tissue side effects." Benderitter M, Caviggioli F, Chapel A, Coppes RP, Guha C, Klinger M, Malard O, Stewart F, Tamarat R, Lwijk PV, Limoli CL.



David Broggio, Alexandra Moignier et Sylvie Derreumaux, chercheurs, travaillent sur un projet de R&D visant à mieux connaître la dose délivrée au cœur.

en charge des patients atteints de cancer, sous la houlette de l'hôpital Saint-Antoine, à Paris. Le dossier d'autorisation est sur la table de l'Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM). « S'il est accepté, ce sera le premier essai mondial de traitement de ces séquelles de radiothérapie par les CSM⁴, avance le Dr Norbert-Claude Gorin, professeur d'hématologie à l'hôpital Saint-Antoine.

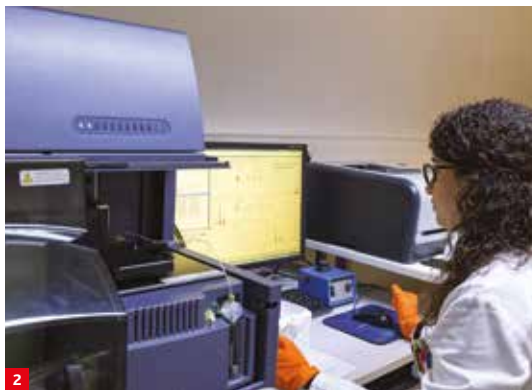
Si ce traitement est efficace, nous pourrions l'utiliser à titre curatif et préventif », se plaît-il à envisager... ■

1. Connective Tissue Growth Factor.

2. <https://professionnels.asn.fr>.

3. irsn.fr, rubrique La Recherche, thèses

4. De tels traitements ont été administrés à titre compassionnel à certains patients sur-irradiés d'Épinal.



REPORTAGE Des biologistes, physiciens, mathématiciens... s'efforcent de comprendre les effets indésirables de la radiothérapie : du dépôt d'énergie au niveau des cellules jusqu'aux impacts physiologiques. Nous avons rencontré les chercheurs « à la paillasse ».

Laboratoire de radiobiologie Dans le viseur des chercheurs



Le calme du long couloir blanc et désert du laboratoire de radiobiologie des expositions médicales de l'IRSN, à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine), est trompeur. Derrière chaque porte, des scientifiques s'affairent. Cinq chercheurs travaillent sur le programme Rosiris, pour comprendre et modéliser les mécanismes biologiques des rayons sur les tissus sains. Agnès François, biologiste, est aux commandes du microscope multiphoton confocal. Elle observe un échantillon de rectum humain issu des marges saines que les chirurgiens retirent avec la tumeur. Avant l'opération, le patient avait reçu une radiothérapie. « Comment ces tissus non cancéreux, à distance de la tumeur, ont-ils été affectés par les rayons ? Les cellules endothéliales [qui tapissent la paroi des vaisseaux sanguins, NDLR] sont-elles devenues pathologiques ? » veut savoir la biologiste. Non pour cet échantillon. Mais pourquoi ? Était-il assez loin de la tumeur ? Le croisement de multiples données

sur de multiples échantillons devrait le déterminer. À l'autre bout du couloir, des doctorants interrogent les mêmes problématiques, sous d'autres angles. Ils cultivent des cellules *in vitro* puis les irradient avant de les étudier : « Vieillissent-elles plus vite, moins vite, différemment des cellules non irradiées ? » se demande Frédéric Soysouvanh, étudiant en 3^e année de thèse. Mariam Ben Kacem, doctorante est attablée devant l'écran d'un cytomètre de flux. Dans l'appareil s'écoulent une par une – à la vitesse de plusieurs centaines, voire milliers par seconde ! –, des cellules préalablement irradiées. À leur passage, « un laser détecte leur taille et la quantité d'ADN qu'elles contiennent », décrit la doctorante. Ainsi, elle saura si les cellules ont été déformées par les rayons, et à quel rythme elles se multiplient. À terme, toutes ces observations permettront, avec l'aide de mathématiciens, d'« élaborer des modèles prédictifs des effets secondaires des radiothérapies », explique Fabien Milliat, responsable du laboratoire. ■

- 1 Grâce au microscope multiphoton confocal, Agnès François, biologiste, voit les différentes colorations dans un même plan très fin de tissu biologique.
- 2 Mariam Ben Kacem, doctorante, observe sur l'écran du cytomètre de flux la quantité d'ADN contenue dans des cellules.
- 3 Après les avoir cultivées dans ce flacon, Frédéric Soysouvanh, doctorant, passera au crible des cellules endothéliales pour étudier les effets des rayons sur leur vieillissement.
- 4 Accompagnée d'Agnès François, sa directrice de thèse, Annaïg Bertho, doctorante, confie à un automate des coupes de tissus pulmonaires. Les différents bains de colorants révéleront au microscope la fibrose potentiellement induite par une irradiation.

■ BIBLIOGRAPHIE

Anthony Bonfrate : « Développement d'un modèle analytique dédié au calcul des doses secondaires neutroniques aux organes sains des patients en protonthérapie », Paris Saclay, thèse soutenue en 2016.

Rima Sayah : « Évaluations des doses dues aux neutrons secondaires reçues par des patients de différents âges traités par protonthérapie pour des tumeurs intracrâniennes », Paris XI, thèse soutenue en 2012.

WWW Pour en savoir plus
 - Le programme Rosiris : www.irsn.fr/rosiris
 - Le programme Baccarat : www.irsn.fr/baccarat
 - Le programme Prisme : www.irsn.fr/Programme-Prisme
 - EpiBrainRad : www.irsn.fr/EpiBrainrad

■ CONTACTS

marc.benderitter@irsn.fr
 jean-françois.bottollier-depois@irsn.fr
 aurélie.desbree@irsn.fr
 isabelle.clairand@irsn.fr
 sophie.jacob@irsn.fr
 sylvie.thellier@irsn.fr

Patrice Blaise, technicien à l'IRSN, effectue un prélèvement de sédiments à Santes, dans l'agglomération de Lille.



© Jean-Baptiste Saunier/Médiatèque IRSN

Surveillance radiologique

Le contrôle de la pollution des eaux de surface

L'ESSENTIEL Dans toute la France, les eaux de surface comme les fleuves ou les ruisseaux font l'objet d'une surveillance radiologique. **TÉMOIGNAGE** Un représentant de la société civile. **INFOGRAPHIE** Une pollution est détectée : l'exemple du ru des Landes. **AVIS D'EXPERT** Un expert en surveillance de l'environnement.



André Guillemette

Représentant de l'Association pour le contrôle de la radioactivité (Acro), au sein de la commission locale d'information (CLI) Areva.

TÉMOIGNAGE « La pollution de la nappe est mieux caractérisée »

L'Association pour le contrôle de la radioactivité (Acro) surveille le niveau de radioactivité dans l'environnement depuis l'accident de Tchernobyl, en 1986. Sur le site Areva de La Hague (Manche), nous prélevons tous les mois de l'eau dans les ruisseaux des alentours. Tous les trimestres, nous recueillons des sédiments, des plantes aquatiques, et des éléments sur la côte – algues, patelles, etc. En 2014, des travaux de reprise des déchets UNGG¹ noyés dans un silo après un incendie en 1981 ont commencé au nord-ouest du site, dans une zone de stockage de déchets. Cela nous a incités à regarder un éventuel impact au niveau du ru des Landes, situé à proximité. En septembre 2016, en analysant des sédiments et des mousses prélevés dans la zone humide où se forme le ruisseau, en aval d'un abreuvoir, nous avons trouvé des niveaux de cobalt 60, d'iode 129, de césium 137 et surtout d'américium 241 beaucoup plus élevés que ce qu'avait annoncé l'exploitant. Lequel a, depuis,

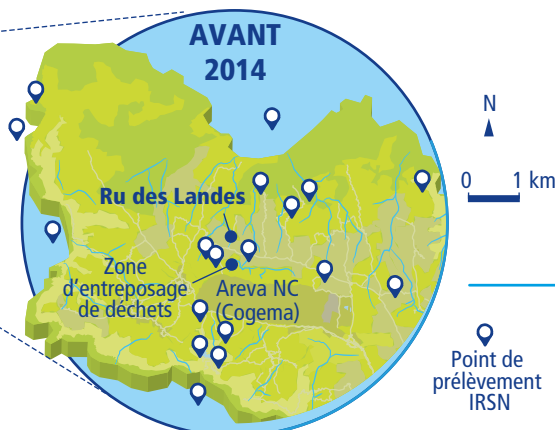
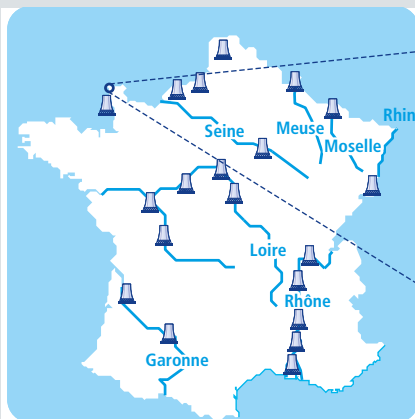
fermé l'abreuvoir. Nous n'avons pas les moyens de mesurer nous-mêmes le strontium ou le plutonium, nous avons envoyé les carottages à un laboratoire suisse, qui a relevé des résultats très élevés en mars 2017. L'analyse isotopique indique qu'ils provenaient de combustibles retraités en 1973-1974. L'IRSN avait repéré ces nucléides dans la zone depuis quelques années mais, à notre connaissance, n'a pas approfondi. Après notre alerte, les experts ont fait de nouveaux prélèvements et ont rendu leurs conclusions. Selon leur rapport², le plutonium viendrait d'un transfert par la nappe phréatique. Pour confirmer cela, il faudrait mieux caractériser la pollution sous le site. Il serait aussi intéressant de faire des carottages plus profonds dans la zone polluée. Enfin, nous sommes surpris par la faible valeur annoncée pour la reconstitution de la dose reçue par les populations. » ■

1. Uranium naturel graphite gaz.

2. Avis IRSN/2017-00136 du 20 avril 2017

Une pollution détectée au ru des Landes

Dans sa mission de surveillance nationale des prélèvements autour du site de la Hague, l'Acro (Association pour le contrôle des échantillons). En 2016, une contamination



En 2014, des travaux sont entrepris sur une zone d'entreposage de déchets radioactifs. En 2016, l'Acro réalise des études complémentaires dans le ru des Landes. Les résultats font état de niveaux élevés de césium et d'américium.

La surveillance nationale des eaux de surface

L'IRSN surveille la radioactivité de l'environnement dans toute la France, et notamment à proximité des sites nucléaires. Il existe différents dispositifs de prélèvements et de mesure pour les eaux de surface.

- Implanté sur les 7 principaux fleuves, le réseau Hydrotéléray déclenche une alarme en cas d'activités susceptibles de résulter d'un rejet accidentel.
- Des hydrocollecteurs recueillent des échantillons d'eau de manière semi-automatique.
- Des préleveurs récupèrent, ponctuellement, à l'aide d'équipements manuels, des échantillons d'eau et des sédiments.

Plusieurs isotopes sont ensuite analysés : le plutonium et l'américium notamment, mais aussi le tritium, le césium, le carbone 14, le strontium et de nombreux radionucléides émetteurs gamma.

1 Les experts surveillent en continu les environs de La Hague

L'Institut y prélève sédiments, eau de mer, végétaux, faune aquatique, herbe, eau de pluie. Il analyse également des échantillons de viande ou de céréales. D'autres acteurs réalisent des mesures en parallèle. C'est le cas de l'Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'ouest (Acro).

3

L'Institut identifie l'origine de la contamination

Le césium provient de fissures de blocs de béton laissés sur la zone d'entreposage en 1974 par Areva. Il a été dispersé dans l'atmosphère.

Le strontium, le plutonium et l'américium se sont infiltrés dans la nappe phréatique via des fosses bétonnées non étanches appartenant à l'industriel.

La surveillance est renforcée

Dès 2018, l'IRSN poursuivra ses analyses semestrielles d'eau et de sédiments dans le ruisseau. Des végétaux aquatiques seront recueillis au niveau de l'abreuvoir. Une carotte de sol sera prélevée.

4

Des travaux seront réalisés

L'industriel fait une proposition de réhabilitation de la zone, notamment en retirant la terre contaminée. Elle est en cours d'instruction par l'IRSN.



RÉGLEMENTATION

L'exploitant d'une installation nucléaire de base (INB) est responsable de la surveillance de son environnement. Il investit les moyens nécessaires pour prouver que son installation n'a pas d'impact sur l'environnement et qu'il maîtrise ses rejets. L'IRSN expertise ce plan.

EN CHIFFRES

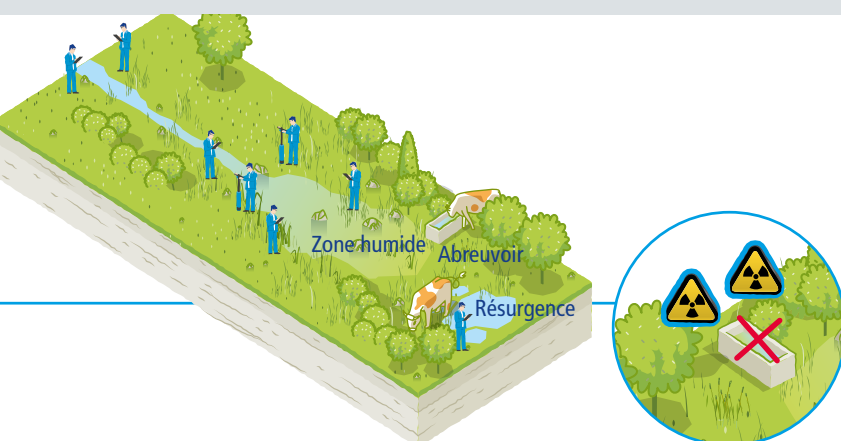
Le laboratoire de surveillance de l'environnement de l'IRSN analyse, en routine plus de 4 000 prélèvements.

Les eaux et sédiments représentent à eux seuls un millier d'analyses.

LES PRÉLÈVEMENTS

Pour surveiller les cours d'eau, étangs, lacs, etc., des préleveurs formés récupèrent des échantillons : eau, sédiments du fond et végétaux aquatiques. L'eau de la nappe correspondante est prélevée via les piézomètres¹ de l'exploitant. L'IRSN choisit les indicateurs les plus pertinents, c'est-à-dire les compartiments – eau, végétal, sédiment – les plus susceptibles d'accumuler l'isotope recherché. Le préleveur note la

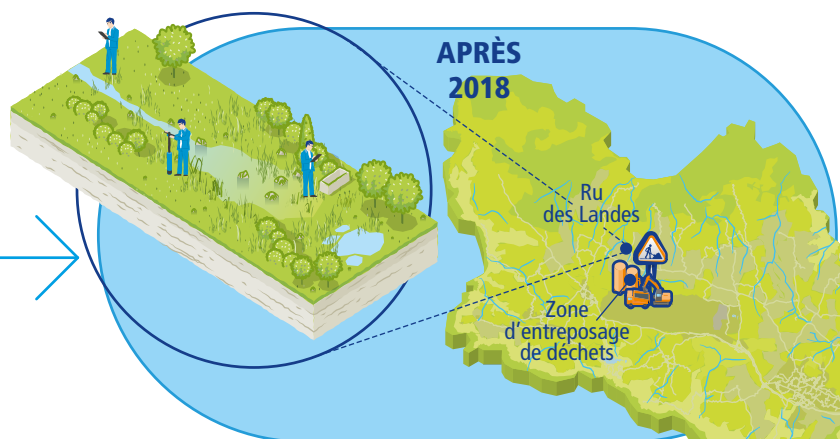
...ale des eaux de surface, l'IRSN analyse
...Hague, et notamment dans le ru des Landes.
...e la radioactivité), y recueille également
...mination est détectée.



2 160 analyses complémentaires sont effectuées au ru des Landes

L'IRSN réalise, en 2016 et 2017, des prélèvements complémentaires dans le ruisseau, dans la résurgence, l'abreuvoir et la zone humide. Des analyses par spectrométrie gamma sont également réalisées in situ.

Des niveaux élevés de césium et d'américium sont confirmés par l'IRSN. L'accès à l'abreuvoir est bloqué par l'industriel.



localisation, la description de l'échantillon et la durée du prélèvement. Le tout est envoyé au laboratoire.

1. Forages permettant de mesurer le niveau de l'eau souterraine

LE TRAITEMENT

Pour pouvoir être analysé, l'échantillon est traité en fonction des radionucléides recherchés. L'eau peut être filtrée, les végétaux sont séchés, broyés puis calcinés, les sédiments sont séchés. Les prélèvements sont conditionnés pour être adaptés aux outils de mesure des métrologues.

LES MESURES RÉALISÉES

La spectrométrie gamma donne une vision globale des émetteurs gamma présents. Potassium et tritium sont aussi souvent analysés. D'autres analyses plus complexes et plus longues – jusqu'à plusieurs semaines –, sont réalisées dans les sédiments ou les végétaux. Elles visent à détecter des radionucléides comme l'uranium, le strontium, le plutonium...

L'IRSN publie tous les résultats sur le site du réseau national de mesure : www.mesure-radioactivite.fr

AVIS D'EXPERT



© Laurent Zylberman / Graphix-Images / Médiathèque IRSN

Maxime Morin

Expert en surveillance de l'environnement

« Nous publions systématiquement nos résultats »

“ Notre Laboratoire de surveillance de l'environnement (LSE) a pour mission de surveiller radiologiquement le territoire national. Nous prélevons des échantillons autour des installations nucléaires de base, des sites contaminés – comme des anciennes mines – des industries utilisatrices de radio-isotopes, et dans des zones non impactées par une activité nucléaire, pour avoir une référence. En fonction des caractéristiques du site – industrielles, environnementales –, nous déterminons quels isotopes rechercher – par exemple le plutonium et l'américium à La Hague – et dans quel compartiment : eau, terre, végétaux, etc. Le plan de prélèvement autour d'un site est fixé chaque année, avec en général des prélèvements mensuels pour l'eau, et trimestriels pour le lait et les végétaux aquatiques. Les échantillons sont analysés par les laboratoires de l'IRSN. Les résultats sont analysés et publiés systématiquement sur le site Internet du RNM¹. Nous pouvons être saisis à tout moment, notamment en cas d'incident, par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN); nous lançons alors des prélèvements et analyses complémentaires. Il s'agit de mesurer l'intensité et l'étendue de la pollution, et d'en déterminer les causes. Nous rendons ensuite un avis public, publié sur irsn.fr.

1. Réseau national de mesure : www.mesure-radioactivite.fr



Maxime Morin
maxime.morin@irsn.fr
01 30 15 36 07

OpenRadiation: les citoyens s'emparent de la mesure

Mesurer la radioactivité, partager l'information en temps réel grâce à un smartphone pour établir une cartographie de la radioactivité : c'est le principe d'OpenRadiation. Cet outil collaboratif de dosimétrie est mis à la disposition du grand public. Explications en 5 questions.

1 En quoi consiste le projet ?

Ce dispositif participatif donne la possibilité à tout citoyen d'effectuer simplement ses propres mesures de radioactivité, où qu'il se trouve, et de les publier sur un site Internet dédié¹. Les données collectées sont accessibles à tous les utilisateurs. Chacun peut les commenter et échanger avec d'autres. Cette initiative s'inscrit dans une double tendance. L'apparition d'applications de dosimétrie destinées au public dans les années suivant l'accident de Fukushima-Daiichi, au Japon, en 2011. Et le développement des sciences participatives, portées par les technologies numériques : smartphones, open data, open source, etc. En France, OpenRadiation est le premier système de dosimétrie qui centralise les données venant

de différentes applications et les met à la disposition de tous. Il ne se limitera pas aux frontières de l'Hexagone et sera proposé en version anglaise. Dévoilé en octobre 2017 lors de la Fête de la science, il s'agit d'un projet participatif à but non lucratif et pédagogique. Il est mené par quatre organismes : l'Institut français des formateurs risques majeurs et protection de l'environnement (Iffo-RME), l'association Planète Science, l'université Pierre-et-Marie-Curie et l'IRSN.

1. www.openradiation.org

www Pour en savoir plus
Les citoyens mesurent eux-mêmes la radioactivité. *Repères* n° 30, p. 21



Le site Internet OpenRadiation offre une cartographie en temps réel.



Ci-dessus, les informations accessibles aux utilisateurs via l'application mobile.



Le dispositif de mesure peut être acheté déjà assemblé ou en kit.

2 Comment partager ses mesures ?

Le dispositif fonctionne avec un compteur Geiger-Müller² – qui peut être acheté déjà assemblé ou à monter soi-même – connecté un smartphone par Bluetooth. Il suffit de télécharger l'application OpenRadiation pour faire des mesures, les consulter et les envoyer sur le site pour les partager en ligne. La géolocalisation de l'utilisateur et les conditions environnantes – hauteur par rapport au sol, mesures réalisées en plein air, dans un bâtiment, en avion, etc. – sont également transmises. Elles servent à évaluer la pertinence des données. À terme, le projet sera également ouvert à d'autres capteurs ou sources de mesure, comme Safecast.

2. Instrument servant à mesurer certains rayonnements ionisants, en particulier les photons X et gamma.

3 Quel est l'intérêt pour le grand public ?

Grâce au partage des mesures réalisées par tous les utilisateurs du site, OpenRadiation offre une meilleure connaissance de la situation radiologique sous la forme d'une cartographie en temps réel.

Ce projet a une vocation pédagogique : informer le grand public sur les risques

liés aux rayonnements ionisants et sur les bonnes pratiques pour effectuer des mesures. C'est une plateforme d'échange entre les citoyens grâce à des fonctionnalités collaboratives : blog, possibilité de commenter les mesures, de créer des espaces dédiés pour des projets ciblés, etc.



4 Qui sont les utilisateurs ?

Tout citoyen peut se procurer le dispositif³ à partir de 2018, pour un coût de 100 à 200 euros. Cet outil s'adresse par exemple aux lycéens pour des projets pédagogiques en classe de première ou de terminale. Plusieurs détecteurs ont déjà été distribués à des lycées. Les commissions locales d'information (CLI) sont intéressées par cet outil pour leur mission de suivi, d'information et de concertation en sûreté, radioprotection et impact des activités nucléaires. En cas de crise, les données recueillies, moyennant une analyse appropriée, pourront être mises à la disposition des acteurs impliqués, en complément de celles existant par ailleurs.

3. Pour savoir comment se procurer le dispositif, rendez-vous courant janvier 2018 sur www.irsn.fr, rubrique Actualités et www.openradiation.org



VIDÉOS

- Le projet OpenRadiation : un dispositif de science participative.
- Le montage de l'appareil de mesure.



5 Quelles différences avec le projet japonais ?

Une application similaire baptisée Safecast⁴ a vu le jour au Japon à la suite de Fukushima. Grâce à cette initiative 100 % privée, la population a réalisé elle-même et partagé des mesures de la radioactivité indépendantes. Elle est aujourd'hui utilisée essentiellement par la population vivant dans des zones contaminées. OpenRadiation s'inspire de Safecast et son interface est conçue pour que les deux projets partagent leurs données.

L'ambition du dispositif français est plus large : centraliser des données provenant de systèmes de mesure divers et faire vivre la communauté d'utilisateurs à long terme, y compris en dehors des situations de crise. Une initiative est également en cours de mise en place par le ministère tchèque de l'Intérieur pour collecter des informations en cas de crise.

4. <https://blog.safecast.org/>

Physicien médical

Le garant des niveaux de référence diagnostiques

Gilles Le Rouzic, physicien médical, met son expertise au service de la radioprotection des patients. Il veille aux bonnes pratiques quant à l'usage des appareils de médecine nucléaire.

La course lente du tramway s'arrête devant le bâtiment flambant neuf du Centre hospitalier régional d'Orléans (Loiret). Depuis 2015, ses locaux vastes et colorés abritent de nouveaux équipements en médecine nucléaire. C'est ici que nous attend Gilles Le Rouzic, physicien médical : « *Les examens d'imagerie utilisant les rayonnements ionisants sont de plus en plus prisés, relève-t-il. La tomographie par émission de positons [TEP] a révolutionné le suivi des patients en cancérologie.* » L'injection aux patients de glucose « marqué » par un atome de fluor radioactif permet de repérer les cellules les plus actives, comme les cellules tumorales. Cette image fonctionnelle est superposée à celle, anatomique, d'un scanner à rayons X réalisé par la même machine dans le même temps d'examen, pour repérer où siègent les cellules tumorales. De tels examens d'imagerie sont régulièrement réalisés au cours de la prise en charge des patients. S'ils facilitent le traitement, ils contribuent aussi à l'accumulation des doses dues aux rayonnements.

Travail d'équipe

Professionnel titulaire du diplôme de qualification en physique radiologique et médicale (DQPRM), le physicien médical a pour mission de paramétrer les appareils et d'optimiser les protocoles. Dans une grande salle climatisée, Gilles Le Rouzic nous présente le TEP-TDM – communément appelé PET-scan – de dernière génération acquis par l'hôpital. Un investissement d'environ 1,7 million d'euros qui procure une meilleure qualité d'image, sans irradier davantage et avec des temps d'examen réduits. Pour évaluer les pratiques du service, Gilles Le Rouzic s'appuie notamment sur les niveaux de référence diagnostiques (NRD). Ces derniers sont déterminés pour les examens les plus fré-



quents, à partir des données envoyées chaque année à l'IRSN par les établissements français.

Les professionnels doivent essayer de se tenir sous cette « barre ». Pour Gilles Le Rouzic, il est possible de faire mieux. D'une part, les progrès technologiques rapides permettent de diminuer drastiquement les doses. D'autre part, pour les examens pour lesquels il n'y a pas de NRD – scanners de repérage associés aux examens TEP... –, il faut s'adapter. Avec une équipe de manipulateurs et de médecins, il recueille régulièrement les informations sur les doses administrées au cours des examens. Après les avoir comparées aux NRD, il met en œuvre des démarches d'optimisation – réglage des appareils, temps d'examen... – puis en évalue les résultats. Une course à la

performance qui rappelle davantage le goût du physicien pour le triathlon que la course lente du tramway... ■

WWW Pour en savoir plus

Niveaux de références diagnostiques : optimiser les doses délivrées. *Repères n°33, pages 18 et 19*



DIAPORAMA
Retrouvez tous les reportages !

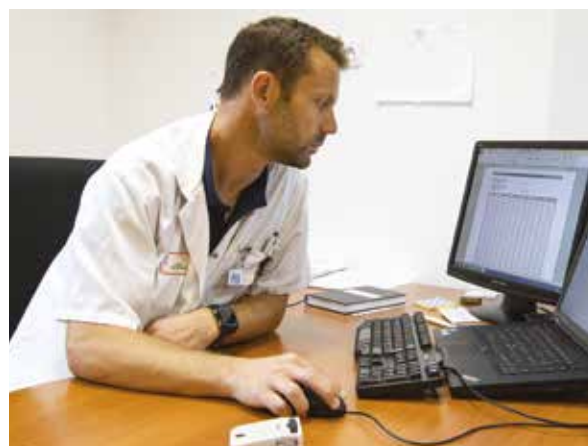


**Imagerie médicale :
une équipe sensibilisée
aux bonnes pratiques**
www.irsn.fr/36



Protection du personnel

Gilles Le Rouzic est également personne compétente en radio-protection (PCR). Il veille à la sécurité du personnel. Pour cela, le service est équipé d'une borne de dosimétrie opérationnelle (ici à l'image), qui enregistre la dose de rayons reçue par les membres de l'équipe, ainsi que d'un contrôleur de contamination. Les employés disposent tous d'un dosimètre individuel qu'ils changent tous les trimestres.



Évaluation des résultats

Gilles Le Rouzic transmet à l'IRSN les doses administrées aux patients et évalue ses démarches d'optimisation avec tableaux et graphiques. Il appelle de ses vœux l'acquisition par l'hôpital d'un logiciel qui faciliterait grandement ce travail.



Le physicien médical, Gilles Le Rouzic, contrôle le bon fonctionnement des appareils selon la réglementation en vigueur et les référentiels publiés par la Société française de physique médicale (SFPM).



Caméra CZT

Adeline Frat, manipulatrice, place une patiente dans la caméra numérique CZT (cadmium-zinc-telluride). C'est la première en région Centre. Pour tous les examens du cœur, elle a remplacé la scintigraphie classique : les doses de rayonnements sont divisées par deux.



Examen diagnostique

Le scanner de ce TEP-TDM est capable de fournir des images de qualité, au prix d'une dose importante pour le patient. « Comme il n'existe pas de NRD pour ces examens, nous avons mis en place une méthode permettant de diviser par trois les niveaux dont nous disposons pour les scanners diagnostiques », se félicite le physicien.

Initiatives en radioprotection

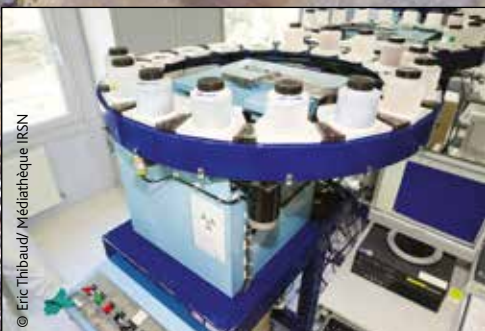
Pauline Chevallier (debout), étudiante en physique médicale, présente aux médecins les résultats d'un nouveau protocole pour les scintigraphies. Le Dr Sabine Gauvain (de dos), chef du service, encourage ces initiatives pour la radioprotection des patients : elle souhaite diffuser ce travail dans des congrès médicaux.





Surveillez l'impact de vos stockages

© mariusz_prusaczyk/Stock by Getty



© Eric Thibaud/ Médiathèque IRSN

Industriel, pour contrôler la radioactivité des eaux de vos piézomètres sur vos installations de stockage de déchets non dangereux*, vous pouvez faire appel à l'IRSN. Le Service d'analyse et de métrologie de l'environnement mesure l'activité des radionucléides naturels et artificiels par spectrométrie gamma. Comment procéder ? L'Institut fournit des flacons de mesure. Il vous suffit de prélever 500 ml d'eau dans les différents points de surveillance de votre site et de nous les envoyer pour analyse. Vous recevrez les résultats sous quatre semaines.

* Surveillance radiologique obligatoire depuis le 1^{er} juillet 2016.

Pour en savoir plus

Tel : +33 (0)1 30 15 52 88
irsn.same@irsn.fr

